



Escola Tècnica Superior d'Enginyers  
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

## PROJECTE O TESINA D'ESPECIALITAT

### Títol

MODELADO NUMÉRICO DEL  
COMPORTAMIENTO DE LOS  
VERTIDOS DE HIDROCARBUROS  
VERTIDOS AL MAR

### Autor/a

AUGUSTO SIGUERO GÜEMES

### Tutor/a

MANUEL ESPINO INFANTES  
RAFAEL MADRIGAL CADAVID

### Departament

Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental

### Intensificació

Enginyeria Marítima

### Data

1 de Julio de 2010



Escola Tècnica Superior d'Enginyers  
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# MODELADO NUMÉRICO DEL COMPORTAMIENTO DE LOS VERTIDOS DE HIDROCARBUROS VERTIDOS AL MAR

CÓDIGO

711-TES-CA-4314

AUTOR

AUGUSTO SIGUERO GÜEMES

TUTORES

MANUEL ESPINO INFANTES  
RAFAEL MADRIGAL CADAVID

*JULIO 2010*

# RESUMEN

**Título:** Modelado Numérico del comportamiento de los hidrocarburos vertidos al mar.

**Autor:** Augusto Siguero Güemes

**Tutores:** Manuel Espino Infantes, Rafael Madrigal Cadavid

En el informe de esta tesina se aborda la problemática de la contaminación marina de los hidrocarburos asociada al transporte marítimo. El gran impacto mediático que suscitaron los grandes accidentes sucedidos en pasado reciente como es el caso del *Prestige* o que lo están haciendo actualmente en el golfo de México debido al accidente de la plataforma petrolífera de la compañía *British Petroleum* (BP) generan controversia en la sociedad justificada por las consecuencias socio-económicas y medioambientales que continuamente son difundidas por los medios de comunicación. Sin embargo, existen otro tipo de vertidos asociados a una serie de operaciones de carga y descarga de los petroleros que se realizan sistemática e intencionadamente de forma ilegal, éstos son menos mediáticos pero igualmente suponen un volumen importante de contaminantes vertidos al océano.

Actualmente los planes de contingencia ya incorporan sistemas de seguimiento y predicción de los vertidos marinos accidentales que determinan el desplazamiento de las mareas negras mediante modelos numéricos. En este sentido, la elaboración de esta tesina se marca como objetivo la implementación del retroanálisis en uno de estos modelos con la intención de desarrollar una herramienta de predicción retrospectiva y así poder reconocer a los buques responsables de vertidos intencionados de hidrocarburos en el mar.

A lo largo del informe de esta tesina, se van a desglosar los procesos que siguen los modelos numéricos para reproducir virtualmente el transporte de los hidrocarburos. De este modo se puede ver como las manchas de petróleo se representan mediante una discretización de un número determinado de partículas y que cada una de ellas se desplaza de manera independiente de las demás. Con este procedimiento se tiene en consideración el hecho de que la sustancia se comporta como un continuo, y a su vez se pueden modelar algunas incertidumbres que alberga el proceso de predicción. También se plantea la problemática que conlleva tener que reproducir simultáneamente procesos caracterizados por escalas espacio-temporales muy diversas y como para poder representar todos estos términos forzadores en un modelo de predicción numérica, el transporte superficial se debe descomponer en una componente media definida por los forzamientos advectivos y una turbulenta cuyo efecto se modela mediante los modelos estocásticos lagrangianos.

Una vez definido el funcionamiento de estos modelos numéricos de predicción, se ha procedido a desarrollar una serie de simulaciones experimentales en el escenario del mar catalano-balear, donde se han podido contrastar los resultados con datos empíricos obtenidos gracias al seguimiento de una serie de boyas Lagrangianas que se lanzaron en el dominio de estudio enmarcadas en el proyecto de investigación AIDMAR. Analizando los resultados obtenidos en estas simulaciones se ha determinado que parámetros son los más influyentes en el contexto de estudio y de

este modo se ha calibrado el modelo numérico para realizar descripciones del transporte lo más cercanas a la realidad posible.

Posteriormente se ha implementado el módulo de retroanálisis al modelo numérico y se ha empleado en la realización de una serie de simulaciones contextualizadas en el mismo escenario y en las cuales se han introducido los valores de los parámetros extraídos del análisis previo. Los resultados obtenidos han permitido concluir que para consolidar el retroanálisis como sistema de apoyo a la investigación del origen de vertidos del tipo operacional se deberá mejorar la estrategia de estudio de los condicionantes que intervienen en los diferentes procesos para poder solventar la incertidumbres que reside en los ejercicios de predicción.

*Palabras clave: Vertidos operacionales, hidrocarburo, retroanálisis, modelo numérico, predicción, forzamientos, forwardtracking*

# ABSTRACT

**Title:** Numerical modeling of the oil spill behaviour at sea.

**Author:** Augusto Siguero Güemes

**Tutors:** Manuel Espino Infantes, Rafael Madrigal Cadavid

The scope of this thesis is to assess the problem of marine oil pollution related to shipping. The high impact of this issue in the media, specially with the major accidents that occurred in the recent past such as the Prestige or the ongoing now in the Gulf of Mexico due to the oil platform accident from British Petroleum (BP), is a very controversial topic in society because of the constant presence of socio-economic and environmental disasters in the news. However, there are other types of discharges associated with the loading and unloading of oil tankers that are carried out systematically and illegally, which are less present in the media but still mean a significant volume of pollutants discharged into the ocean.

The current contingency plans already provide monitoring and prediction of accidental marine spill which determine the displacement of oil slicks using numerical models. In this way, this dissertation has the goal of implementing the hindcast in one of these models with the aim to develop a retrospective prediction tool and thus be able to recognize the ship responsible for the illegal discharges of oil to the sea.

Throughout this report, the different process that several numerical models to virtually reproduce the transportation of hydrocarbons have, will be studied. In this way the oil slicks can be represented by a discretization of a certain number of particles independent from each other. This procedure takes into account the fact that the substance behaves as a continuum, and in turn the uncertainties that occur in the prediction process can be modeled. Issues related to the use of different processes characterized by very different spatial and temporal scales are also dealt with. The surface transport is decomposed into a mean component defined by advective forcings and turbulent whose effect is modelled by Lagrangian stochastic models.

Una vez definido el funcionamiento de estos modelos numéricos de predicción, se ha procedido a desarrollar una serie de simulaciones experimentales en el escenario del mar catalano-balear, donde se han podido contrastar los resultados con datos empíricos obtenidos gracias al seguimiento de una serie de boyas Lagrangianas que se lanzaron en el dominio de estudio enmarcadas en el proyecto de investigación AIDMAR. Analizando los resultados obtenidos en estas simulaciones se ha determinado que parámetros son los más influyentes en el contexto de estudio y de este modo se calibra el modelo numérico para realizar descripciones del transporte lo más cercanas a la realidad posible.

Once the performance of these numerical forecast models is defined, a series of experimental simulations on the Catalano-Balearic Sea scenario are developed, being able to compare the results with empirical data obtained by monitoring a series of Lagrangian buoys that were launched in the domain of study within frame of the AIDMAR research project. Analyzing the results of these simulations, the most

influential parameters in the study context have been determined, and thus the numerical model is calibrated to make accurate descriptions of the reality.

Then a hindcast module has been implemented, to conduct a series of simulations in the same scenario, using the parameters taken from the previous analysis. The results obtained concluded that to strengthen the hindcast as a support system, an improvement of the operational strategy study of the conditions involved in different processes should be done, resolving the uncertainties that lie in the prediction exercises.

*Key words: operating oil spills, oils, backtracking, numerical modeling, forecast, forcings, forwardtracking*

# AGRADECIMIENTOS

Me gustaría aprovechar estas líneas para enfatizar el papel que han desarrollado en la elaboración de esta tesina Manuel Espino y Rafael Madrigal, directores del presente trabajo de investigación, que lejos de convertir la sinergia que la ha hecho posible en un mero trámite, me han brindado sistemáticamente su apoyo, compartiendo conmigo sus extensos conocimientos y garantizándome todas las facilidades posibles. Toda muestra de agradecimiento es poca.

Mil gracias.

# ÍNDICE

RESUMEN.....	ii
ABSTRACT.....	iv
AGRADECIMIENTOS.....	vi
ÍNDICE .....	vii
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....	1
CAPÍTULO II. CONTAMINACIÓN MARINA POR HIDROCARBUROS .....	4
2.1    Fuentes de contaminación por hidrocarburos en el mar .....	5
2.1.1    El transporte marítimo de hidrocarburos .....	6
2.1.2    Grandes incidentes vs contaminación sistemática de tipo operacional ..	8
2.1.3    Consecuencias del contaminante vertido.....	11
2.1.4    Protocolos de actuación.....	13
2.2    Modelado Numérico como Herramienta de Gestión de sucesos.....	14
2.2.1    El modelado numérico .....	15
CAPÍTULO III. PREDICCIÓN NUMÉRICA DELTRANSPORTE DE HIDROCARBUROS VERTIDOS AL MAR.....	19
3.1    Introducción.....	20
3.2    Principios físicos del transporte de una sustancia en un medio fluido.....	20
3.3    Transporte advectivo horizontal.....	22
3.3.1    Corrientes.....	22
3.3.2    Viento y Oleaje .....	22
3.4    Transporte difusivo horizontal.....	26
3.4.1    Varianza de las fluctuaciones de las velocidades ( $\sigma_u^2$ ) y escala temporal de correlación Lagrangiana (T).....	29
3.5    Implementación numérica en el modelado .....	31
3.6    Procesos de envejecimiento de los Hidrocarburos (weathering).....	34
3.6.1    Esparcimiento ( <i>Spreading</i> ) .....	35
3.6.2    Evaporación.....	36
3.6.3    Emulsionado.....	36
3.6.4    Biodegradación.....	37
3.6.5    Foto-oxidación .....	37
3.6.6    Disolución.....	38
3.6.7    Embarrancamiento .....	38
3.6.8    Sedimentación.....	39
3.6.9    Dispersión verical .....	39



3.6.10	Bases de datos.....	41
3.7	Diagrama de flujo del programa MELT2DO.....	42
CAPÍTULO IV. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELADO DE RETROANÁLISIS.		
RESULTADOS. ....		47
4.1	Análisis y contraste de las características del dominio de estudio .....	47
4.2	Implementación del retroanálisis en el modelo MELT2DO.....	54
4.2.1	Transporte Advectivo horizontal.....	55
4.2.2	Transporte Difusivo horizontal .....	56
4.2.3	Implementación numérica en el modelado.....	57
4.3	Determinación de las condiciones iniciales para realizar el Retroanálisis ....	58
4.4	Análisis del modelado numérico en modo retroanálisis.....	70
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES.....		80
REFERENCIAS .....		84
Bibliografía.....		85
Webgrafía .....		86
ANEJO 1. SIMULACIONES PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL ESCENARIO DE ESTUDIO.....		87
ANEJO 2. SIMULACIONES PARA EL CÁLCULO DE LAS CONDICIONES INICIALES. RESULTADOS .....		95
ANEJO 3. SIMULACIONES EN MODO RETROANÁLISIS PRECISIÓN Y TAMAÑO DE LA MANCHA. RESULTADOS.....		102

## INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

---

## *CAPÍTULO I*

Existen varias vías a partir de las cuales los hidrocarburos llegan al medio marino. Dichas vías suelen ser o bien terrestres, o bien marinas pero también pueden proceder de afloramientos naturales o derivadas de las actividades del hombre. La contaminación por hidrocarburos tiene así muchas facetas y contempla muchos responsables. En el desarrollo de esta tesina nos centraremos en la problemática de la contaminación marina asociada al transporte marítimo.

Dado que los países consumidores de hidrocarburos se encuentran alejados de los productores, normalmente es necesario efectuar su transporte por vía marítima, lo que puede traer como consecuencia vertidos en el mar. En nuestro ámbito marítimo más cercano se observa como a pesar de que la superficie del Mar Mediterráneo supone únicamente el 1% de la de todos los océanos, por sus rutas circulan el 30% del petróleo mundial, y como es lógico, a mayor intensidad de tráfico mayor riesgo de que se produzcan sucesos de contaminación marina, ya sean de tipo accidental o de tipo operacional.

Los vertidos operacionales consisten en descargas voluntarias de contaminantes asociadas a tareas que llevan a cabo sistemáticamente las embarcaciones vinculadas al transporte marítimo. Son un ejemplo de este tipo de vertidos las operaciones de limpieza de los tanques de carga de hidrocarburos que se realizan cuando se va a transportar un producto diferente al anterior y también las operaciones de lastrado y deslastrado con agua de mar que se llevan a cabo en los petroleros para mantener la estabilidad en los trayectos en vacío.

Para regular las fuentes de esta contaminación en el mar, es necesario analizar la situación actual de las infraestructuras asociadas al transporte marino y enmarcar en una legislación internacional a todos los agentes implicados con el objetivo de prevenir posibles sucesos. Paralelamente a esto, se debe trabajar para incorporar las herramientas que pueda proporcionar el colectivo científico y que ayuden a la gestión y a la toma de decisiones en estos casos.

El presente trabajo se centra en el estudio y el análisis de una de estas herramientas, el Modelado numérico de deriva de hidrocarburos en el mar, que permite comprender, interpretar y reproducir el comportamiento de los hidrocarburos vertidos en el medio marino mediante ejercicios de predicción.

Debido a una serie de acontecimientos como la crisis del Prestige en 2002, se ha reforzado en nuestro país la idea de que la previsión debe ser una herramienta operacional al servicio de los responsables de gestión de derrames accidentales hasta el punto de que en los planes de contingencia se establecen estos sistemas de previsión para determinar los protocolos de actuación en caso de situaciones de crisis. Sin embargo, la utilización de este tipo de modelados en el ámbito del retroanálisis para de alguna manera predecir el pasado y ayudar a identificar a los buques que realizan los vertidos intencionados de tipo operacional está en vías de desarrollo.

El **objetivo principal** de esta tesina ha sido la implementación del modo retroanálisis en un modelado numérico que constituya una herramienta de apoyo a la investigación del origen de los vertidos ilegales de tipo operacional al medio marino. Para ello se han marcado los siguientes **objetivos parciales**:

- Se revisará el estado actual del conocimiento sobre la predicción numérica del transporte de hidrocarburos vertidos al mar identificando los principales procesos y forzamientos a tener en cuenta.
- Se analizará la implementación numérica en el modelo numérico de los procesos que gobiernan la deriva de los contaminantes sobre la superficie del mar y se examinarán las subrutinas que caracterizan el funcionamiento de un modelo numérico de predicción en el cual se pretende implementar el modo retroanálisis.
- Se adecuará el modelo numérico al escenario de estudio mediante la calibración de determinadas variables empleando datos experimentales para contrastar los ejercicios de predicción.
- Se implementará el modo retroanálisis en el modelado cerciorándose del correcto funcionamiento del mismo.
- Se determinarán las condiciones iniciales idóneas para el estudio en modo retroanálisis mediante la observación de la evolución de la distribución de las partículas en modo forwardtracking.
- Finalmente se aplicará el modelo en modo retroanálisis (*backtracking*) a diferentes casos prácticos y se realizará un análisis exhaustivo de los resultados.

# CONTAMINACIÓN MARINA POR HIDROCARBUROS

---

## *CAPÍTULO II*

## 2.1 Fuentes de contaminación por hidrocarburos en el mar

Se suele hablar del transporte marítimo como del causante de éste tipo de contaminación de, pero como veremos a continuación, existen otro tipo de problemáticas que igualmente son fuentes de contaminación que además tienen una regulación menos definida.

Como se puede observar en la Tabla 2.1, la contaminación por hidrocarburos puede ser clasificada según dos conceptos, su origen y la causa del mismo:

Origen:

- terrestre, debido a actividades humanas ligadas con el medio costero
- marítima, debido al transporte y a las instalaciones en mar abierto
- atmosférico, aportación de ciertos compuestos debido a las lluvias

Causa:

- Accidental, representa un suceso puntual en tanto en el espacio como en el tiempo, presumiblemente evitable e involuntario.
- Operacional o consecuencia directa del conjunto de actividades humanas que intervienen en el medio, con una cierta intencionalidad.
- Natural, impredecibles afloraciones en yacimientos naturales.

Origen / Tipo	Accidental	Operacional	Natural
<i>Terrestre</i>	<i>Roturas / accidentes:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Industrias</li> <li>- Refinerías</li> <li>- Oleoductos</li> <li>- Puertos</li> </ul>	<i>Efluentes:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>- urbanos</li> <li>- industriales</li> <li>- agrícolas</li> </ul>	<i>Afloramientos</i>
<i>Marino</i>	<i>Transporte marítimo</i>  <i>Extracción en off-shore</i>	<i>Puntuales:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>búnkering</i>/cargas</li> <li>- lavado sentinas</li> </ul> <i>Crónicos:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>- perdidas aceites</li> </ul>	<i>Afloramientos en la corteza terrestre</i>
<i>Atmosférico</i>		<i>Crónicos:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>- lavado por lluvias en zonas urbanas.</li> </ul>	

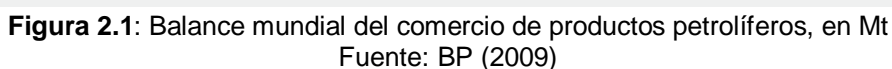
**Tabla 2.1:** Clasificación de las fuentes de hidrocarburos al medio marino.

Fuente: Modificado de Comerma (2004)

El volumen total de hidrocarburos que llegan a los océanos es difícil de evaluar con exactitud, pero según diversos estudios ésta cifra oscilaría entre los 1,3 y 3,2 millones de toneladas anuales, lo que supone alrededor del 0.05% de la producción de crudo anual.

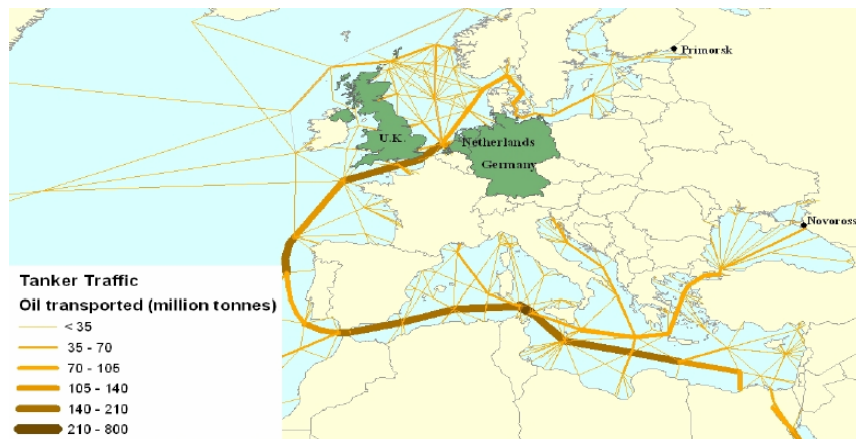
### 2.1.1 El transporte marítimo de hidrocarburos

- Cada año se transportan por vía marítima unos 1.500-1.800 millones de toneladas de crudo a bordo de miles de buques petroleros, suponiendo el 35% del transporte mundial oceánico. (Ver figura 2.1)
- A esta cantidad habría que sumarle otros 400-500 millones de toneladas de productos refinados, como gasolina, gasóleo, fuel, etc.



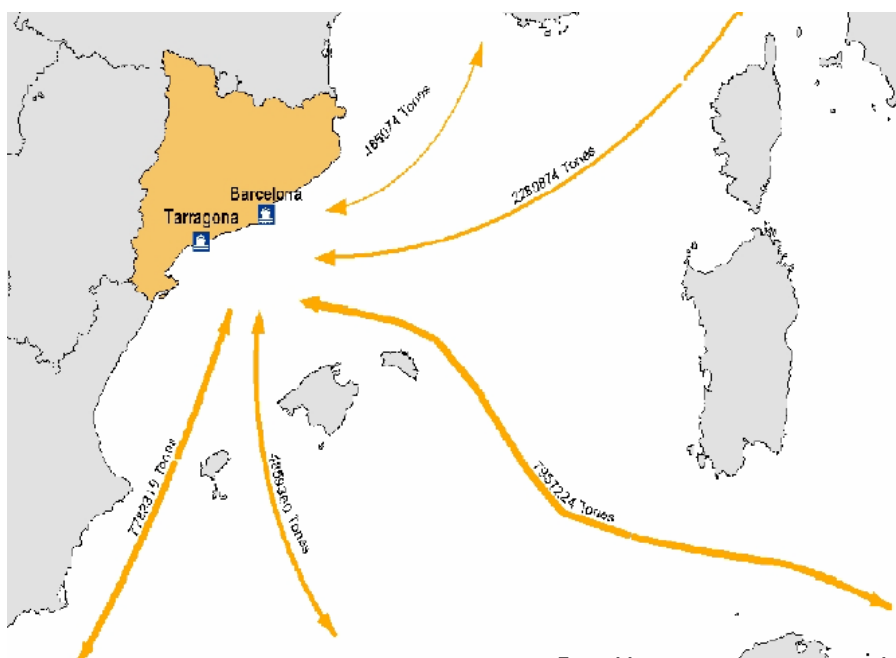
- 
- 6

- Además, las aguas europeas se encuentran en el camino de muchos otros petroleros que transportan su carga a distintos destinos, por lo que el total de crudo atravesando cada año las aguas de la UE sería superior a los 1.000 MT.
- La UE necesita alrededor de 6.000 fletes anuales para abastecer su demanda de crudo, de los que se encargan unos 1.500-2.000 petroleros.
- La superficie del Mar Mediterráneo es el 1% de la de todos los océanos, por sus rutas circulan el 30% del petróleo mundial y cada año llegan al Mar Mediterráneo del orden de 650.000 toneladas de hidrocarburos. (Ver figura 2.2)



**Figura 2.2:** Transporte de petróleo en el Europa  
Fuente: <http://www.seasearcher.com/lmiu/index.htm> (2008)

- El Estrecho de Gibraltar es uno de los puntos más congestionados de tráfico marítimo, atravesándolo cada año unos 18.000 buques petroleros.
- Los puertos españoles reciben anualmente más de 100 millones de toneladas de hidrocarburos, de las que cerca del 70% corresponden a hidrocarburos pesados, como crudo, fuel o asfalto.



**Figura 2.3:** Tráfico de petróleo en las proximidades del litoral catalán.  
Fuente: CAMCAT (2003)



## 2.1.2 Grandes incidentes vs contaminación sistemática de tipo operacional

El transporte marítimo, como cualquier tipo de tráfico, crea un impacto sobre el medio, siendo una fuente de contaminación de forma directa e indirecta. A mayor intensidad de tráfico mayor riesgo de accidentes. Todos los grandes buques (cargueros y petroleros) necesitan volúmenes importantes de combustible. Así, los depósitos de combustible pueden llegar a contener hasta 4000 Tn de fuel pesado, susceptibles de ser derramados accidentalmente.

Por otro lado, de forma directa las embarcaciones generan residuos propios y residuos de los fueles de combustión. Además, en el caso de los petroleros existen una serie de operaciones de carga y descarga que generan una contaminación llamada de tipo operacional. Si bien es cierto que la contaminación que se produce es pequeña al lado del volumen transportado, lo reprochable es que se trata de operaciones intencionadas.

Debido al intenso tráfico marítimo, este tipo de descargas voluntarias están siendo sometidas a una persecución exhaustiva por parte de diversos proyectos internacionales específicos destinados a la vigilancia de los buques infractores. Éstos vertidos operacionales característicos de los petroleros son:

### *Operaciones de des-lastrado*

Para mantener la estabilidad en los trayectos en vacío, los petroleros necesitan cargar un lastre mediante agua del mar. Ésta carga temporal en algunas ocasiones se realiza en los mismos tanques de hidrocarburo y puede ser vertido directamente al mar. Actualmente existen una serie de imposiciones técnicas en los buques, como la retención a bordo de los propios residuos oleosos, la introducción de los tanques de lastre limpio (*clean ballast tank*, CBT) o la de tanques de lastre segregados (*segregated ballast tank*, SBT)

### *Operaciones de limpieza de tanques*

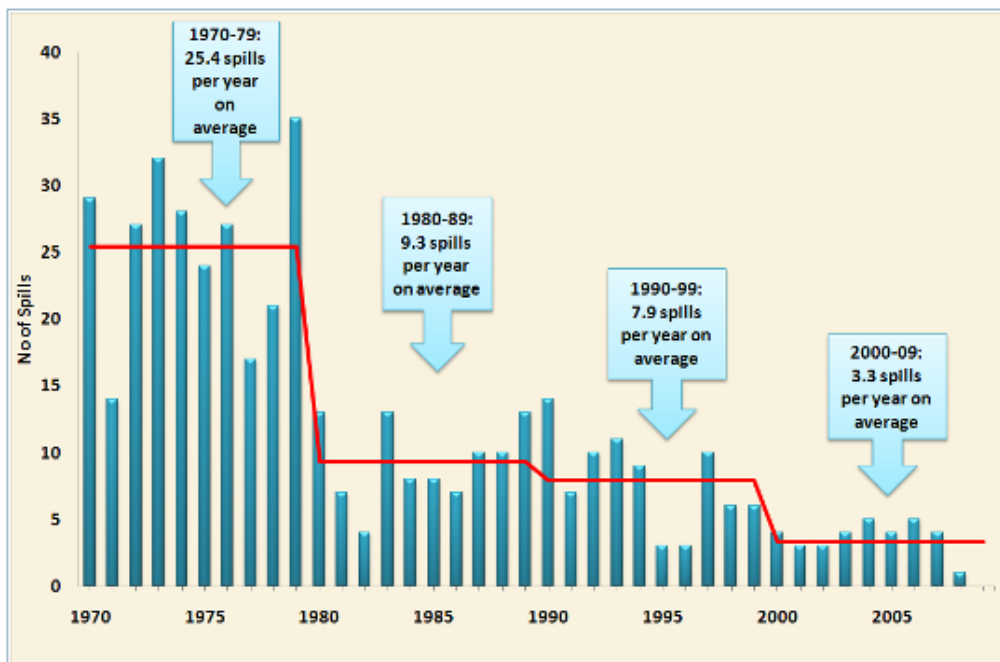
En ocasiones es necesario limpiar los tanques vacíos antes de una nueva carga debido a que el producto a introducir es diferente al anterior. En ese caso, los residuos de limpieza van a parar directamente al mar. En la actualidad para evitar lo anterior se recomienda que el lavado se efectúe con petróleo.

### *Operaciones de “bunkering”*

De nuevo, para garantizar la estabilidad, los tanques de combustible propio del buque suelen utilizarse a modo de tanques de lastre. Puede llegar a ser práctica habitual verter al mar esa agua contaminada sucediendo lo mismo que en el des-lastrado. Hoy en día como medida correctora de este problema los buques deben disponer de separadores de aguas oleosas para evitar el vertido de contaminantes.

Pero, a pesar de estas medidas de corrección, como siguen dándose casos de descargas marítimas ilegales, las técnicas de seguimiento y vigilancia ambiental son fundamentales para la aplicación correcta de las leyes vigentes. La implementación del retroanálisis en el modelado numérico es una herramienta de ayuda excepcional para combatir tales vertidos, puesto que una vez descubierta una mancha, se podrá determinar su trayectoria hacia atrás en el tiempo y averiguar que embarcación es sospechosa de haber originado la descarga.

Otro tipo de acción contaminante son los derrames por accidentes marítimos. El impacto mediático de éstos es mucho mayor debido a su repercusión en los medios. Según la ITOPF (*Internacional Tankers Owners Pollution Federation Ltd.*), y como puede observarse en la Figura 2.4 el número de accidentes de este tipo ha ido disminuyendo debido a la implementación de nuevas normativas.



**Figura 2.4:** Numero de accidentes ocurridos anualmente con mas de 700Tn vertidos.  
Fuente: ITOPF (2009)

El conocimiento preciso de las causas de los accidentes marítimos se ha convertido en el eje de las medidas normativas, organizativas y de gestión a adoptar, a niveles nacional, europeo y/o internacional. La investigación y análisis técnico de los accidentes marítimos resulta fundamental para evitar su repetición. El ITOPF (Tabla 2.2) tipifica los accidentes en sus estadísticas del 2009, con las siguientes categorías: colisión, varada, fallo estructural, explosión e incendio y otros:

	< 7 Tn	7 -700 Tn	>700 Tn	Total
<b>Operaciones</b>				
Carga/Descarga	3155	383	36	3574
Consumo	560	32	0	592
Otras	1221	62	5	4166
<b>Accidentes</b>				
Colisiones	176	334	129	639
Varadas	236	265	161	662
Estructurales	411	96	59	566
Fuego/Explosión	87	33	32	152
<b>Otros</b>				
Otros	1983	44	22	2049
<b>Total</b>	<b>7829</b>	<b>1249</b>	<b>444</b>	<b>9522</b>

**Tabla 2.2:** Origen de los derrames por causa y cantidad vertida  
Fuente: Modificado de ITOPF (2009)

Para poder comprender el porqué de los accidentes marítimos es preciso profundizar en los aspectos fundamentales que han generado una degradación del sector en lo que concierne a seguridad y al estado obsoleto de los buques.

Hoy en día, el sector marítimo está cada vez mas atomizado: abundan los pequeños armadores con un único barco y generalmente obsoleto y suele descargar toda la responsabilidad del devenir del buque al capitán. Anteriormente, las grandes compañías petrolíferas disponían de su propia flota, desempeñando el papel de armadores y fletadores. Debido al aumento significativo de intermediarios en el sector ha habido un fraccionamiento de los costes y responsabilidades con lo que cada día resulta más difícil establecer una línea clara propietario-responsable de la carga-responsable del buque. Éste hecho ha influido en el aumento de la edad media de los buques petroleros, que actualmente oscila alrededor de los 19 años factor preocupante dado que la fase de obsolescencia se sitúa a partir de los 20 años.

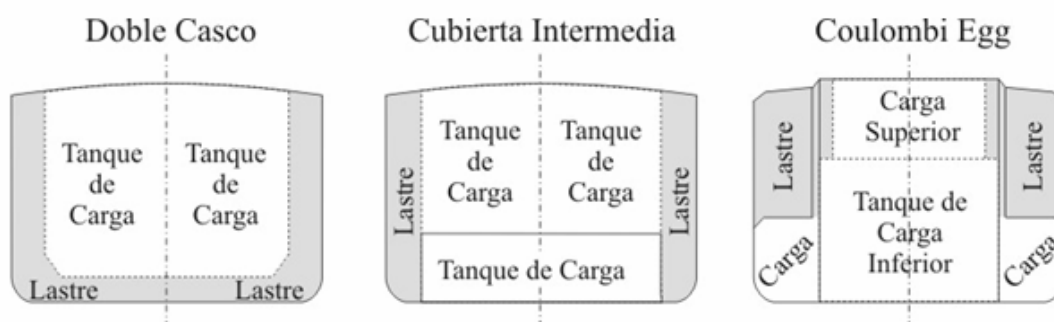
Si tenemos en consideración que más del 50% de los buques naufragados entre 1989 y 2008 tenían entre 20 y 24 años, vemos como, en efecto, el envejecimiento-obsolescencia de los buques es una de las causa principales de los accidentes marítimos. Siendo más rigurosos encontramos en la falta de mantenimiento a la verdadera causa del colapso estructural del barco (ya sea por efectos mecánicos, térmicos, de corrosión o de fatiga). Por ello es necesario garantizar su calidad mediante inspecciones regulares del estado del buque.

La importancia de la “nacionalidad” del buque, simbolizada en la bandera del pabellón resulta incuestionable en relación a la seguridad. El abanderamiento de los buques se ha desvirtuado en los últimos decenios. Tradicionalmente la bandera te vinculaba al país donde se controlaba la actividad económica del buque, sin embargo actualmente ese vínculo ha desaparecido y mas de la mitad de la flota mundial está registrada en países de registro abierto, liderados por Panamá.

Éstos países de "banderas de conveniencia" ofrecen al armador unas condiciones de explotación muy cómodas y en ocasiones permiten reducir costes administrativos (registro, mantenimiento, impuestos, etc.) reduciendo indirectamente la seguridad integral del buque.

El caso del Prestige ejemplifica perfectamente la problemática internacional actual: el barco fue fabricado en Japón, reparado en China, abanderado en Bahamas, certificado en EEUU, con carga Rusa, tripulación filipina, capitán Griego, solicitó auxilio por emergencia frente las costas españolas, se hundió en aguas internacionales afectando y contaminando entre otros a Portugal, España y Francia.

La implantación del doble casco en el diseño de los buques es una medida correctora de urgencia, ya que asegura una mejor protección de la carga frente colisiones, pero su implementación que encarece en un 20% la construcción de los buques, no es efectiva en embarrancadas o varadas violentas y según diversos estudios agrava problemas de corrosión interna de casco. Con lo cual su implementación obligatoria en diversas normativas internacionales ha generado cierta controversia.



**Figura 2.5:** Secciones transversales de diferentes diseños de doble casco.  
Fuente: Zamora (2003)

### 2.1.3 Consecuencias del contaminante vertido

Las consecuencias del vertido de hidrocarburos en el medio marino pueden ser por causas diversas: función de las circunstancias, el medio afectado y la respuesta ofrecida.

La contaminación de tipo crónica, asociada a las actividades "operacionales" en el mar puede tener consecuencias graves a largo plazo y difíciles de evaluar. Por otro lado, la contaminación producida por un derrame accidental suele tener consecuencias económicas muy graves. Sin embargo, desde el punto de vista medioambiental, la contaminación de tipo crónica suele acarrear consecuencias mas graves a largo plazo

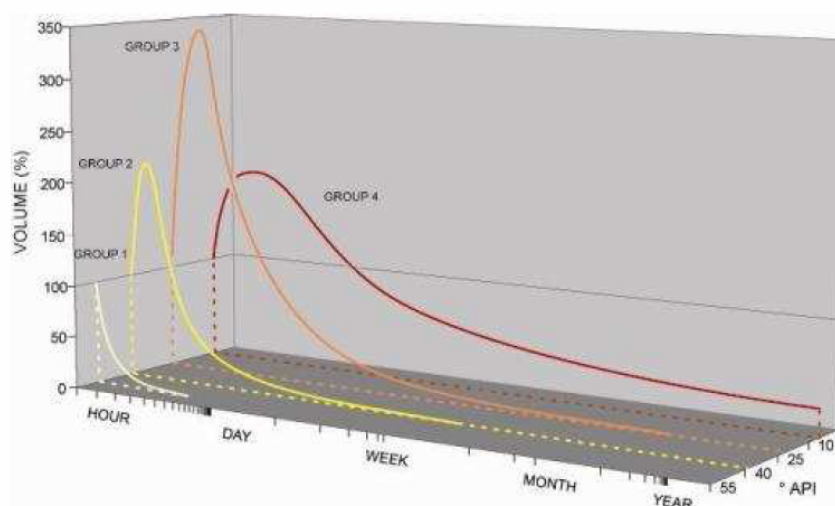
Un derrame de volumen importante de hidrocarburos suele generar lo que se denomina comúnmente una marea negra. El hecho de que habitualmente la densidad de los hidrocarburos sea menor que la del agua marina propicia que el contaminante permanezca en superficie y que sea transportado según las corrientes oceánicas hasta que es recogido o hasta que llega al litoral, donde se concentran muchas actividades económicas como el turismo o la pesca. Por ejemplo durante la crisis del

Prestige, los sectores económicos mas afectados fueron la marisquería, la pesca extractiva y la acuicultura, que teniendo en cuenta que en Galicia se desarrolla el 40% del total de la actividad pesquera nacional tuvo un impacto económico muy significativo.

Un factor a tener en cuenta a la hora de organizar la respuesta a un evento de derrame accidental es la persistencia del hidrocarburo en superficie. No se debe establecer un mismo protocolo de actuación si el fuel va a permanecer en la superficie del mar una semana o un año, ya que durante un periodo de tiempo de un año el contaminante puede ser transportado a grandes distancias y la incertidumbre de la trayectoria es mayor. A continuación se muestra la clasificación de los Hidrocarburos en función de la persistencia y la relación Volumen persistente – tiempo en función del grupo de clasificación:

Grupo	Densidad	Ejemplos
Grupo I	Menor de 0,8	Gasolina, Keroseno
Grupo II	0,8 - 0,85	Gas Oil, (Crudo de Abu Dhabi)
Grupo III	0,85 – 0,95	Crudo ligero de Arabia, Crudo del mar del Norte (p. ej. Forties)
Grupo IV	Mayor de 0,95	Fuel pesado, Hidrocarburos de crudo Venezolano

**Tabla 2.3:** Clasificación de los HC en función de la persistencia.  
Fuente: Modificado de ITOPF (2009)



**Figura 2.6:** Persistencia en función del grupo de hidrocarburo  
Fuente ITOPF (2009)

Una valoración adecuada de las diferentes consecuencias de un vertido o derrame en el mar es imprescindible para determinar un protocolo de actuación para la ayuda de toma de decisiones.

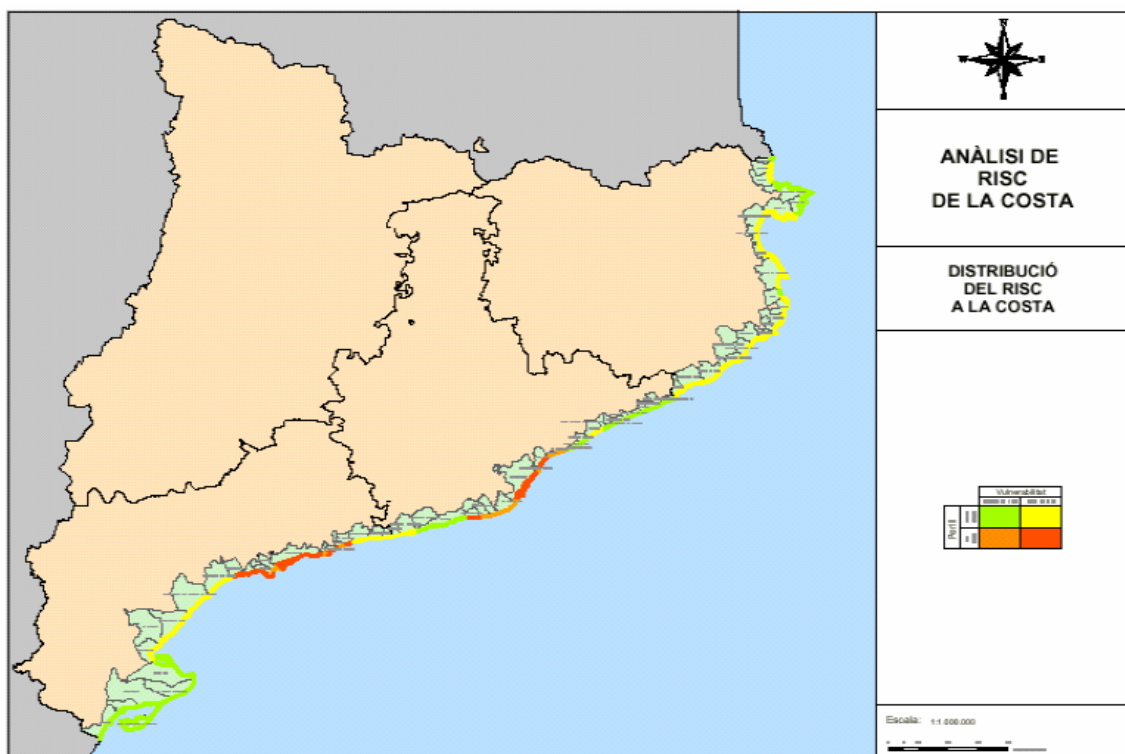
## 2.1.4 Protocolos de actuación

Un protocolo de actuación consiste básicamente en establecer las directrices que determinarán las pautas para dar una respuesta adecuada a un episodio de contaminación marina mediante la coordinación de las operaciones necesarias potenciando los recursos disponibles. Este marco de colaboración debe promover la sinergia entre personal especializado para dar la respuesta mas eficaz posible manteniendo siempre el objetivo de minimizar las consecuencias del suceso.

En Cataluña se elaboró en 2003 el CAMCAT (*Pla Especial d'Emergències per Contaminació Accidental de les Aigües Marines a Catalunya*) bajo el marco del “*Plan Nacional de contingencias de Contaminación Marina Accidental*”(2003).

Los objetivos básicos que persigue el CAMCAT (2003) son definir y coordinar las actuaciones de los diferentes agentes involucrados (administraciones, instituciones y privados) en caso de contaminación marina accidental. Para ello, en el CAMCAT se plantean los siguientes temas:

- Evaluación de riesgo: evaluación del peligro de contaminación y evaluación de la vulnerabilidad del medio litoral (figura 2.7).
- Definición de la organización y funciones en la lucha contra la contaminación
- Operatividad: Criterios, Actuaciones y coordinación
- Medios y recursos existentes
- Activación del plan en función de diferentes situaciones de alerta: Pre-alerta, Alerta o Emergencia



**Figura 2.7:** Mapa de riesgo de la costa catalana.  
Fuente CAMCAT (2003)

Dependiendo de la localización del suceso también se llevarán a cabo diferentes procedimientos de recuperación y contención. En mar abierto se suele proceder recuperando cantidades importantes del derrame mediante *skimmers*, en cambio en zonas costeras se efectúan tareas de contención salvaguardando el litoral y si el hidrocarburo llega a la costa se disponen operativos de limpieza. En realidad si se trata de un vertido masivo es necesario organizar las actuaciones para la lucha contra la contaminación en las diferentes etapas, siendo crucial la observación y el seguimiento de las manchas, aspecto en el que profundizaremos en el próximo apartado.

Por último es necesario comentar la preocupación actual para establecer los posibles emplazamientos de una serie de puertos o zonas de refugio contemplado por la UE, que determina que los planes de emergencia nacionales deberían habilitar zonas para dar refugio a buques en peligro, pero la localización de las mismas no resulta una decisión fácil, ya que suele entrar en conflicto con otros usos del litoral.

## **2.2 Modelado Numérico como Herramienta de Gestión de sucesos.**

Como se ha comentado en el apartado anterior, evitar cualquier tipo de vertido de hidrocarburos en el mar es objetivo prioritario y la legislación actual pretende prevenir que se den lugar situaciones de éste tipo. Pero en caso de que ocurra un suceso, se debe llevar a cabo una gestión adecuada de manera que se minimicen las consecuencias del mismo. Para que tal gestión sea óptima, los responsables deben nutrirse de herramientas para ayudar a efectuar la toma de decisiones. Existen muchos factores a considerar, pero entre todos ellos, es fundamental conocer la situación presente así como la futura evolución, de este modo la previsión entra a formar parte de la toma de decisiones. En ocasiones también nos puede interesar conocer la situación pasada, para averiguar el origen de una hipotética mancha de hidrocarburo vertida en un tiempo pasado.

La oceanografía y su incertidumbre juegan un papel fundamental en la previsión. Gracias al desarrollo científico y a la introducción del cálculo computacional, la capacidad de previsión de los sistemas observacionales ha mejorado enormemente a lo largo de los últimos decenios.

Los sistemas observacionales conjuntamente con los modelados numéricos son una herramienta fundamental de apoyo a la toma de decisiones y su operacionalidad se traduce en dar una respuesta coordinada en el menor tiempo posible, mediante unos patrones de transmisión de datos, una robustez y una eficiencia de los modelos de cálculo. En definitiva consolidar una sinergia entre todos los agentes involucrados en su desarrollo para materializar el concepto de Oceanografía Operacional.

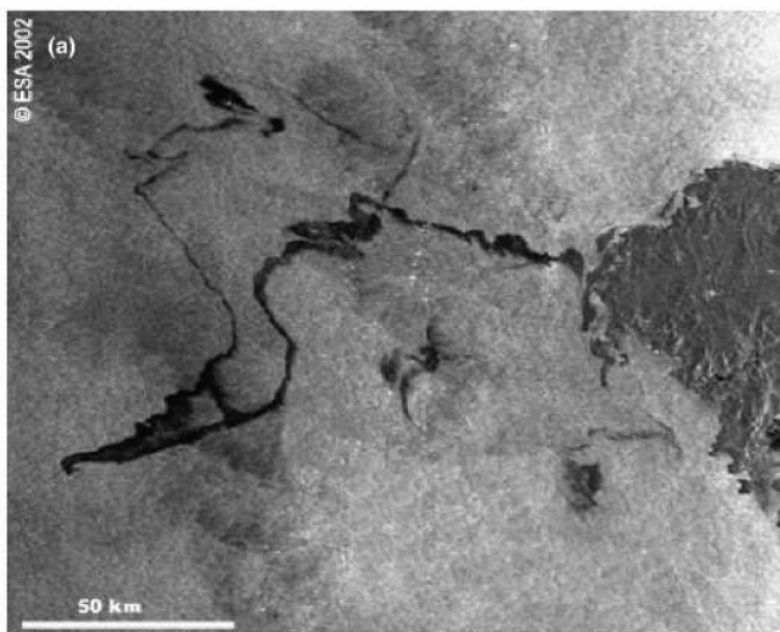
La Oceanografía Operacional parte de la necesidad de disponer de una información lo mas detallada posible del océano y de su relación con la atmósfera, para la utilización de sus recursos y la gestión de las incertidumbres que en él residen.

Esto se materializa mediante un proceso que incluye:

- Una actividad rutinaria de adquisición de datos
- Transmisión rápida de las observaciones a centros de asimilación de datos.
- Procesado de los datos mediante un modelado numérico
- Mecanismo de de interpretación y diseminación rápida de resultados a instituciones y otros clientes.

Éste proceso se marca como objetivo suministrar a tiempo real información descriptiva del estado actual del mar, que permita realizar un ejercicio de previsión continua de las futuras y pasadas condiciones del mar. A su vez también permite hacer una recopilación y un análisis de datos que muestren las tendencias históricas.

A nivel internacional, se han ido implementando diferentes sistemas de Oceanografía Operacional y su incorporación ha logrado prever situaciones de peligro así como reducir las consecuencias de un suceso. De hecho, crisis como la del Prestige en 2004 (Ver figura 2.8) o la del golfo de México éste mismo año demuestran la necesidad de incorporar de forma internacionalmente coordinada, sistemas de predicción de éste tipo.

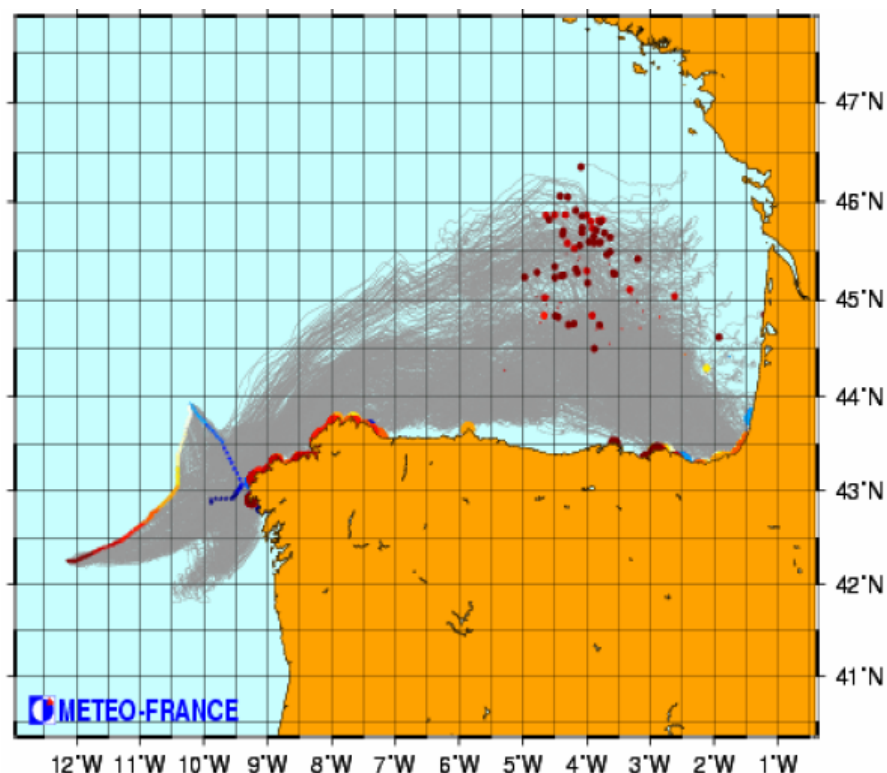


**Figura 2.8:** Imagen SAR del vertido del Prestige  
Fuente: <http://www.esa.int/export/esaCP> (2002)

### 2.2.1 El modelado numérico

Como se ha comentado con anterioridad, en el caso de un vertido de hidrocarburo al mar el modelado numérico se debe confeccionar como herramienta para comprender, interpretar y reproducir su comportamiento. Para ello es necesario estudiar que procesos circulatorios se dan lugar en el mar y de que manera repercuten en el transporte y la dispersión de los HC. Ver ejemplo en la Figura 2.9





**Figura 2.9:** Trayectoria del fuel vertido por el Prestige según el modelo de Meteo-France  
Fuente: <http://france.meteofrance.com> (2004)

Al modelado numérico se le exige que sea robusto y versátil para que pueda abarcar gran parte de la casuística que puede darse en un vertido, sencillo para simplificar el volumen de información a procesar y que también sea capaz de incorporar datos empíricos medidos en tiempo real para reajustar o rectificar una previsión. Dentro de un modelo de éste tipose pueden distinguir claramente dos módulos, el de deriva y el de *weathering* o envejecimiento.

En el módulo de deriva se deben de tener en cuenta una serie de consideraciones para garantizar la versatilidad, la sencillez:

#### *La escala de resolución.*

La escala de resolución espacial y temporal depende de los dominios de estudio. En caso de que las condiciones del dominio estén muy bien definidas y acotadas en el tiempo como por ejemplo en un recinto portuario, el modelado se plantea a escala local y se podría utilizar una aproximación euleriana del problema de transporte de contaminantes que podría llegar a permitir una mayor resolución de los procesos.

En caso de trabajar en un suceso de crisis de contaminación por vertido en mar abierto, la escala de resolución es mucho mayor tanto espacial como temporalmente y se suele emplear una aproximación lagrangiana para resolver el transporte de contaminantes.

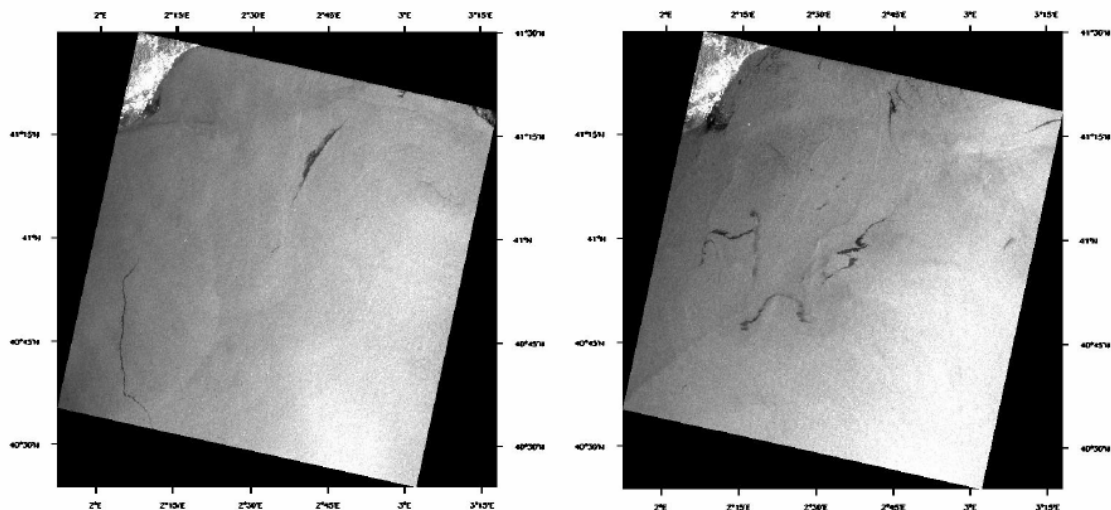
## Los forzamientos

Se deben identificar los principales forzamientos que gobiernan los fenómenos de advección y dispersión del vertido, como lo son el viento, el oleaje y las corrientes marinas, caracterizar su importancia relativa e identificar interacciones significativas entre ellos.

## Forward – Backward

En función de si el vertido ha sido del tipo accidental o del tipo operacional, nos puede interesar que el programa nos proporcione información de estados futuros o pasados, por lo tanto debe existir una opción de retroanálisis que nos permita transportar los vertidos hacia atrás en el tiempo que sirva como herramienta en sucesos del tipo operacional como los de la figura 2.10. Actualmente éstos son los productos más habituales que pueden ofrecer los sistemas de oceanografía operacional:

- *Análisis*, que proporcionan descripciones lo más exactas posible del estado presente de océano y de la atmósfera.
- *Predicción*, predicciones del estado oceánico (y atmosférico) futuro tan lejos en el tiempo como sea posible.
- *Retroanálisis*, predicciones de estados pasados, usando paleodatos, que muestran pautas de cambio.



**Figura 2.10:** Observaciones de derrames operacionales frente el litoral de Barcelona.  
Fuente: CAMCAT (2003)

Paralelamente al módulo de deriva del modelo, también se puede implementar un módulo de *envejecimiento* en el que se caracterizan los procesos de degradación del hidrocarburo y se calcula la evolución de las propiedades físico-químicas del fuel a lo largo del tiempo. La inclusión de este modulo en el modelo, requiere una serie de formulaciones de los diferentes procesos físico-químicos característicos del envejecimiento, unas consideraciones acerca de la interacción entre dichos procesos, unas calibraciones para enmarcarlos en un sistema operacional y una base de datos

con parámetros característicos de los diferentes tipos de HC para definir el estado inicial de los mismos en un supuesto vertido. La información relativa al tipo de producto derramado es fundamental para conocer su estado y composición, pero también para establecer un punto de partida de cara a caracterizar su envejecimiento y así poder planear la manera más eficiente las tareas de recuperación.

En el Laboratorio de Ingeniería Marítima (LIM), centro adscrito a la UPC, se está trabajando en los últimos tiempos en desarrollar un modelado numérico de la deriva y envejecimiento de los hidrocarburos vertidos al mar. Comerma (2004) en su tesis doctoral elaboró un primer programa llamado *ARLEQUÍN*. Durante la confección del mismo se implementaron todas las consideraciones comentadas con anterioridad y se desarrolló un programa en consonancia con el estado del arte contemporáneo. En la actualidad y a partir del anterior se está desarrollando una segunda versión del modelo mas acorde con las consideraciones actuales y sobretodo perfeccionando el término difusivo que gobierna el movimiento turbulento de las partículas. Ésta segunda versión se ha rebautizado con el nombre de *MELT2D0* (Madrigal, Comunicación personal). En el siguiente apartado se pretende hacer una breve introducción al funcionamiento de éste modelo haciendo hincapié en los principales agentes forzadores del transporte advectivo, en el papel de la difusión turbulenta y en los diferentes procesos de envejecimiento a los que se ve sometido un hidrocarburo vertido al mar.

PREDICCIÓN NUMÉRICA DEL TRANSPORTE  
DE HIDROCARBUROS VERTIDOS AL MAR

---

*CAPÍTULO III*

## 3.1 Introducción

Existen una serie de forzamientos en el mar que afecta a cualquier producto vertido en el agua del océano. Éstos son: el viento, el oleaje, las corrientes y la turbulencia oceánica. Se pueden distinguir los procesos advectivos a gran escala, asociados al transporte de masa dominados por las corrientes marinas y el efecto del viento y el oleaje; de aquellos procesos difusivos de pequeña escala que son los responsables de modificar sustancialmente la concentración del contaminante.

Los hidrocarburos son contaminantes no-conservativos, lo que conlleva que una vez derramados, sus propiedades físico-químicas varíen con el tiempo. Este proceso se denomina *weathering* y consiste en una serie de subprocesos que degradan el hidrocarburo. Los más importantes de éstos procesos serían: El *spreading* o esparcimiento, la evaporación, el emulsionado, la foto-oxidación y la biodegradación.

En éste apartado nos centraremos en describir los principales forzamientos del transporte y dispersión de los hidrocarburos y los procesos más importantes de *weathering* o envejecimiento, así como el modo en el que se han implementado en los modelos numéricos.

## 3.2 Principios físicos del transporte de una sustancia en un medio fluido.

El modelo implementado en el programa *MELT2D0* (Madrigal, comunicación personal) se ha concebido con el objetivo de poder dar una respuesta lo más cercana posible al tiempo real. Así pues, de cara a simplificar el proceso iterativo y teniendo en cuenta que el conjunto de procesos horizontales de circulación y turbulencia se desarrollan a una escala espacial y temporal muy superior a la de los procesos verticales, en este modelo se han considerado únicamente los procesos de transporte horizontal sobre la superficie del mar, obviando la posibilidad de transporte y mezcla vertical.

Para describir el modelo empleado, repasaremos brevemente el fundamento teórico del transporte de contaminantes presentando las leyes que lo gobiernan.

### *Ecuación fundamental del transporte*

El transporte en un flujo laminar se rige por la denominada ecuación de convección-difusión (ecuación 3.1), obtenida a partir de imponer la conservación de la masa del contaminante y de la relación entre la ley de difusión pura y la variación de concentración en un flujo laminar. Suponiendo el fluido incompresible y combinando dichas expresiones obtenemos la ecuación de convección-difusión molecular:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \sum_{i=1,3} u_i \frac{\partial C}{\partial x_i} - D_m \sum_{i=1,3} \frac{\partial^2 C}{\partial x_i^2} = 0 \quad (3.1)$$

donde:

C= concentración del contaminante

$u_i$ = componentes de la velocidad de un fluido

$D_m$ =coeficiente de difusión molecular uniforme.

Imponiendo la 2ª ley de Newton a un volumen diferencial obtenemos las ecuaciones de Navier Stokes (ecuación 3.2), que caracterizan el movimiento de un flujo laminar incompresible e isotérmico.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \sum_{k=1,3} u_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \cdot \sum_{k=1,3} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_k^2} = 0 \quad (3.2)$$

Ecuaciones de Navier-Stokes, donde:

$u_i$ = componentes de la velocidad de un fluido

p= presión

$F_i$ =fuerzas de volumen

$\nu$ = viscosidad cinemática

Como se puede apreciar, en la ecuación 3.1 no se han incluido los términos fuente / sumidero del contaminante, ni los procesos que afectan al decaimiento del mismo, por lo tanto, en nuestro caso la cantidad de hidrocarburo que procesará el modelado permanecerá constante a lo largo de lo que dure el ejercicio de previsión.

Estas ecuaciones rigen el transporte y la dispersión de un flujo laminar, pero en el medio marino, la mayoría de los flujos en el océano no son laminares sino que son de naturaleza turbulenta. En este tipo de flujos, las principales variables físicas siguen patrones de fluctuaciones aleatorias difíciles de caracterizar. Para poder representar el efecto de los flujos turbulentos en cada punto del espacio y en cada instante en el modelo, es necesario replantear las ecuaciones anteriores de manera que cualquier variable pueda ser descompuesta según su componente puramente advectiva y según su componente difusiva.

De esta forma es posible calcular, interpolar e integrar cada componente de forma independiente, lo que permite abordar el calculo del transporte advectivo horizontal por un lado y el transporte difusivo horizontal por otro. Esto se traduce en la posibilidad de generar un modelado más versátil que tenga en cuenta la diversidad de flujos y patrones de circulación que actúan a escalas espaciales y temporales muy diversas. Por ejemplo tener en cuenta las corrientes generales de carácter estacional y superponerlas a esquemas de circulación mucho mas locales como las corrientes debidas al viento o también, como veremos en las próximas líneas, la aparición de estos nuevos términos permitirá efectuar una parametrización de la turbulencia con un modelo Estocástico-Lagrangiano.

### 3.3 Transporte advectivo horizontal

En el problema que nos ocupa, los procesos de transporte advectivo horizontal predominan por encima del resto. Éste factor hace que sea de especial interés analizar los principales forzamientos que determinan la deriva de un contaminante, su efecto combinado así como la forma de incorporarlos al modelado hidrodinámico.

#### 3.3.1 Corrientes

Hay dos tipos de corrientes en el océano: las corrientes superficiales, que constituyen el 10% del agua del océano y se encuentran desde los 400 m de profundidad hacia arriba y las corrientes de agua profunda que afectan el otro 90% del océano.

Dado que en el presente trabajo se pretende analizar el transporte superficial de los contaminantes nos interesa reconocer que fenómenos afectan a las corrientes superficiales, éstos són:

Las corrientes geostróficas son las provocadas por los gradientes de densidades de las distintas masas de agua del océano, relacionándose con los campos de temperatura y salinidades. Estas corrientes existen a muy gran escala.

Las corrientes de marea desplazan grandes cantidades de agua debido a la atracción gravitacional de la luna. Éstas tienen un comportamiento armónico y su patrón suele ser bien conocido. El rango de velocidades varía muchos según la localización. Por ejemplo en el mar Mediterráneo son prácticamente inapreciables si las comparamos con las que se dan en el mar Cantábrico.

En el Mar Mediterráneo existe una importante variabilidad de las corrientes, lo que resalta la necesidad de garantizar la posibilidad de acceder a una herramienta de medición y previsión en tiempo real de estas variables, en otros términos, la oceanografía operacional.

#### 3.3.2 Viento y Oleaje

El viento genera una tensión sobre la superficie del mar que provoca el arrastre de la capa más superficial de agua por transferencia de momentum. Este transporte imperará sobre los demás en zonas costeras y de plataforma continental, donde el efecto del resto de forzamientos es relativamente menor. La cantidad de agua desplazada dependerá de la duración e intensidad del viento.

La tensión del viento ( $\tau_s$ ) que se genera en la superficie del mar se relaciona con la velocidad del viento  $W_{10}$  (el viento a 10 metros sobre la superficie del mar) según la ley cuadrática:

$$\tau_s = \rho_a \cdot C_D \cdot W_{10}^2 \quad (3.3)$$

Donde:

$C_D$ : coeficiente de arrastre en superficie

$\rho_a$  : densidad del aire ( $\sim 1,2 \text{ Kg/m}^3$ )

$W_{10}$ : velocidades del viento (a 10m sobre la superficie, en m/s)

Esta tensión superficial se puede expresar también en términos de otro coeficiente de arrastre:

$$\tau_s = \rho_w \cdot f_{agua} \cdot U_{wo}^2 \quad (3.4)$$

Donde:

$f_{agua}$  : coeficiente de arrastre del agua

$\rho_w$  : densidad del agua de mar ( $\sim 1025 \text{ Kg/m}^3$ )

$U_{wo}$ : velocidades de la capa superficial del agua, en m/s

Combinando ambas expresiones y suponiendo  $f_{aire}=f_{agua}$  (dependen de la misma rugosidad dinámica) obtenemos la relación entre la velocidad del agua en superficie en relación a la del viento a 10m sobre la misma.

$$\vec{U}_{wo} = \sqrt{\frac{C_D}{f_{agua}}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_a}{\rho_w}} \cdot \vec{W}_{10} \mapsto \vec{U}_{wo} \cong 0,03 \cdot \vec{W}_{10} \quad (3.5)$$

Esta expresión relaciona la deriva de una partícula con el forzamiento del viento, pero siendo rigurosos se trata de una aproximación, ya que realmente  $U_{wo}$  y  $W_{10}$  no comparten exactamente la misma dirección (Allen, 2005 y Allen & Plourde, 1999). Es bien sabido que la deriva de una partícula describe una trayectoria desviada ligeramente respecto a la dirección del viento. En el hemisferio norte esta ligera desviación es hacia la derecha. En cualquier caso, en tareas de predicción de la deriva de partículas en la superficie del mar nos encontraremos continuamente con incertidumbres en prácticamente todas las etapas del proceso, desde imperfecciones en las aproximaciones de las leyes de la hidrodinámica hasta falta de información en los datos de vientos y corrientes. Por ello y porque este tipo de modelos numéricos de “oil spill” están concebidos para dar respuesta a los diferentes sucesos prácticamente a tiempo real, no se contempla la posibilidad de incluir este tipo de procesos de subescala con los que se pretenderían abarcar niveles de precisión difíciles de alcanzar que representarían un coste computacional que lastraría temporalmente el modelado.

El factor 0,03 que se ha obtenido es una primera aproximación para evaluar la deriva de una mancha u objeto flotante debida a la acción del viento, pero el mismo oscila entre 2% y 4% en función de muchos factores; sobretodo de la situación océanometeorológica.



En la capa superficial de las aguas de los océanos, el oleaje también genera un empuje horizontal. Éste es conocido como “deriva de Stokes” y afecta a la capa superficial de espesor típicamente proporcional a la altura de las olas. También existe una compleja interacción entre el viento y el oleaje, por ello teóricamente sería necesario analizar específicamente la formación y evolución del oleaje en el mar, aspecto que no está incluido de forma habitual en el modelado de la hidrodinámica.

Con el objetivo de caracterizar el efecto del oleaje en el transporte superficial de los contaminantes, se pueden diferenciar dos casos bien opuestos:

- Si tenemos un oleaje irregular (tipo *sea*) generado por un viento local, se puede suponer que la dirección del empuje generado por el viento y el generado por el oleaje tienen la misma dirección. Así, en caso de que se diera la circunstancia se podría aumentar ligeramente el factor del 3% visto anteriormente para incluir el efecto del forzamiento ocasionado por las olas.
- En cambio, si el oleaje con el que nos encontrásemos fuese de mar de fondo (tipo *swell*), las direcciones de las olas y del viento no tienen por qué coincidir. Por ejemplo puede darse el caso de que un oleaje de éste tipo generado mar adentro esté llegando a la costa y que no esté relacionado con el viento local, distinto al que generó las olas mar adentro. Incluso puede darse el caso de que el viento local sea inexistente pero que en cambio sí que exista éste tipo de oleaje. En éste caso, el empuje dependerá de las características del tren de olas según la siguiente expresión:

$$U_{wo} \approx \frac{g \cdot H}{8 \cdot C} \quad (3.6)$$

donde:

g: aceleración gravedad

H: altura de ola, en metros

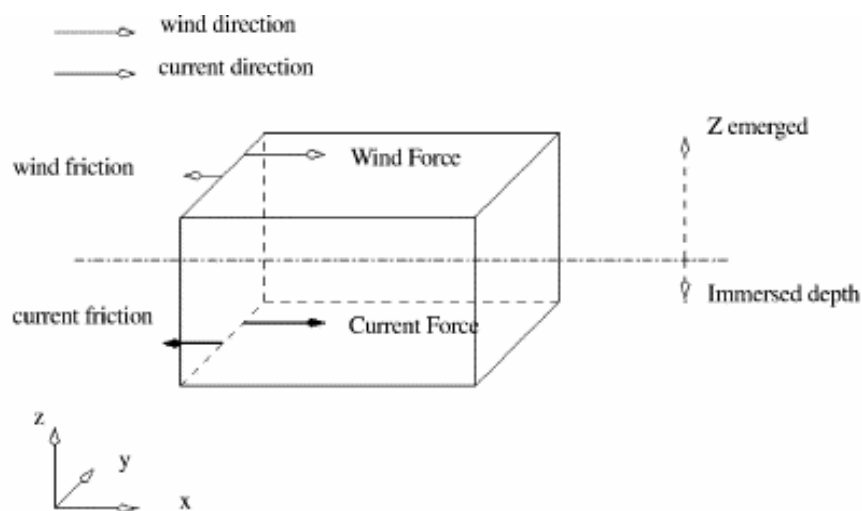
C: celeridad del tren de olas en m/s

El efecto del oleaje tiene especial repercusión en zonas costeras, puesto que a nivel superficial es el principal agente de transporte en dirección costa debido a que siempre tiende a orientarse según el litoral por efecto de la refracción.

Como se ha comentado con anterioridad, el viento es el principal agente generador del oleaje. Eso hace que haya una estrecha relación entre ambos forzamientos. Desasociar el efecto de uno sin tener en cuenta el efecto del otro no es una tarea sencilla. De hecho en el artículo de carácter divulgativo de Hackett et al. (2004) se propone una manera de efectuar la previsión de la deriva de cualquier tipo de objetos en el mar (Por ejemplo containers caídos al océano, barcos que van a la deriva, “*oil spills*” o incluso personas que puedan haber sufrido algún tipo de accidente). En particular, se efectúan una serie de averiguaciones que determinan que para objetos relativamente pequeños, las fuerzas ejercidas por las olas son despreciables y se afirma que solo se deberían incluir en un modelado de forma explícita si éste está

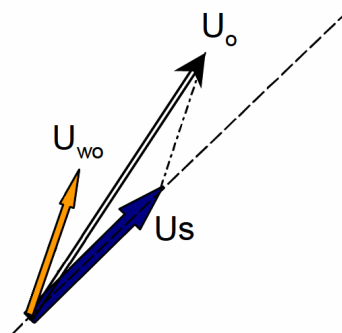
expresamente confeccionado para objetos relativamente grandes. La justificación de la omisión de éste forzamiento para objetos pequeños, como lo serían las manchas de hidrocarburos en el mar se debe a que considerar el efecto del mismo como agente forzador independiente únicamente es significativo en el caso en que la longitud del objeto en la dirección de las olas sea del orden de la longitud de onda característica de a ola.

Por otro lado, Daniel et al. (2002) se plantea un modelo hidrodinámico específico para containers en el que se hace especial hincapié en la importancia que tiene el grado de inmersión de los objetos (más concretamente de los containers) sobre el efecto del oleaje en la deriva del mismo tal i como se muestra en la figura 3.1



**Figura 3.1:** Fuerzas actuantes en un container sobre la superficie del mar.  
Fuente: Daniel et al.(2002)

Sin embargo, la contribución de la interacción del viento con el oleaje como agente de transporte superficial del contaminante tiene que verse evidenciada en el conjunto de los forzamientos. Por lo tanto se considera en el modelo MELT2DO la opción de aumentar ligeramente el factor del 3% que relaciona las velocidades  $W_{10}$  y  $U_{wo}$  con la finalidad de que se vea reflejada la posible alteración sobre el desplazamiento de las partículas ocasionada por la sinergia oleaje-viento.



**Figura 3.2:** Descomposición del Vector velocidad.

En la figura 3.2 se muestra como la deriva superficial total de la mancha ( $U_o$ ) se puede descomponer como la suma de la velocidad de arraste del viento sobre la mancha ( $U_{wo}$ ) más la velocidad de las corrientes superficiales ( $U_s$ ). Como veremos mas adelante, es necesario incorporar al modelo de transporte toda la información relativa a vientos y corrientes para poder adveectar cada una de las partículas en cada instante de tiempo.

### 3.4 Transporte difusivo horizontal

Los procesos de transporte difusivo se refieren tanto al concepto de difusión turbulenta como al de difusión pura por diferencia de concentraciones del contaminante. Éstos procesos se caracterizan por una escala espacial y temporal mucho menor que los procesos advectivos. Por razones de capacidad de cálculo limitada, el modelado de la hidrodinámica no puede solucionarse para todas las escalas simultáneamente, por lo que se centra en una escala espacio-temporal determinada. De ésta forma, todos aquellos procesos de sub-escala no pueden ser reproducidos por el modelo pero son tenidos en cuenta mediante su parametrización. Para ello se empleará un modelo estocástico Lagrangiano que reproduzca las fluctuaciones de las velocidades en sub-escalas.

Un Modelo Estocástico Lagrangiano (MEL) permite obtener las trayectorias de partículas sobre un fluido haciendo una analogía con la hipótesis del modelo de desplazamiento microscópico de una molécula siguiendo la teoría del movimiento browniano. Para representar la posición de una partícula sometida a este tipo de movimiento se idearon los procesos estocásticos, una herramienta de cálculo mediante la cual se caracteriza la difusión turbulenta que transporta el conjunto discreto de partículas que representan un hidrocarburo.

Los modelos que representan este fenómeno postulan la hipótesis de que la posición de la partícula evoluciona de forma Markoviana, es decir que describen procesos cuya densidad de probabilidad condicionada en el instante  $t_n$  depende únicamente del valor del proceso en su estado precedente  $t_{n-1}$  sin importar sus estados anteriores (Griffa, 1996). Estos modelos son adaptaciones concretas de la ecuación general de Langevin y han demostrado ser muy adecuados para modelar el movimiento de la deriva de los contaminantes sobre el océano. (Spaulding et al. 2005)

Las siguientes consideraciones se tienen en cuenta en el desarrollo de los modelos markovianos

- El campo de velocidades bi-dimensional. Esto es debido a que en este estudio se realiza un análisis del transporte superficial.
- Las partículas se desplazan libremente y de manera independiente por el campo de velocidades; el movimiento de cada partícula no presenta correlación con la de las demás.
- Las partículas no afectan a la dinámica del fluido en el que se encuentran.
- Las dos componentes de la velocidad son independientes

En función del escenario donde esté enmarcado el estudio, el modelado hidrodinámico del transporte superficial en los océanos se aproxima en mayor o menor medida al transporte real. De ésta manera, implementando un Modelo Estocástico Lagrangiano se logra alcanzar una mayor precisión que permite reproducir de la manera mas fidedigna posible todos los procesos físicos que intervienen en el movimiento de las partículas. Sin embargo, el orden de los desplazamientos debidos al campo de velocidades turbulentas en algunas ocasiones puede ser infinitesimal y otras puede tener una magnitud semejante al transporte advectivo. Por lo tanto, y con la voluntad de englobar toda la casuística, existen diferentes modelos específicos para los diversos marcos de estudio.

El primer modelo Markoviano se conoce como “*random walk*” y asume que la posición de la partícula sobre la superficie del mar  $\mathbf{x}$  ( $x_1, x_2 = x, y$ ) es una variable Markoviana. Este modelo supone que las escalas de las aceleraciones y de las velocidades de las fluctuaciones son infinitesimales en comparación a las advectivas.

Las ecuaciones que gobiernan el transporte de las partículas según el modelo *random walk* son (Spaulding et al. 2005):

$$\begin{aligned} dx &= Udt + dx' \\ dx' &= K^{1/2} dw \end{aligned} \quad (3.7)$$

Con condiciones iniciales  $t=0$  predeterminadas.  $dx$  es el desplazamiento total que efectúa una partícula durante el intervalo  $dt$ ,  $U(x,t)$  es la velocidad debida al transporte advectivo,  $dx'$  es el desplazamiento debido al campo de velocidades turbulentas y  $dw(t)$  es el incremento aleatorio de una distribución normal.

El factor  $K$  es el coeficiente de difusión turbulenta y viene dado por (Spaulding et al. 2005):

$$K = \sigma_u^2 T \quad (3.8)$$

Donde  $\sigma_u^2$  es la varianza de las fluctuaciones de las velocidades y  $T$  es la escala temporal de correlación Lagrangiana. Ambos valores deben ser objeto de estudio previo ya que tienen un valor característico en cada escenario.

La ecuación 3.7 muestra que el movimiento de las partículas viene dado por la suma de las contribuciones de los procesos advectivos y de la turbulencia. De ésta forma la partícula recibe un impulso aleatorio debido a la acción del campo turbulento, pero no retiene en la memoria información acerca del impulso experimentado en el paso de tiempo anterior. En este modelo el valor de  $T$ , y por lo tanto de  $dt$  son pequeños en comparación con las variaciones temporales de  $U$  y con el paso de tiempo, por lo tanto el modelo *random walk* será aplicable para casos en los que el paso de tiempo tome un valor significativamente mayor al de la escala temporal de correlación Lagrangiana.

El desplazamiento promedio (con respecto a su origen) generado por la fluctuación en éste modelo puede ser calculado analíticamente como (Spaulding et al. 2005):

$$S_{RW} = 2Kt \quad (3.9)$$

Donde  $RW$  se refiere a las siglas de *Random Walk*. Como se puede observar la dispersión de partículas crece linealmente con el tiempo.

El segundo modelo Markoviano es conocido como "*Random flight*" y en él se asume que tanto la posición  $\mathbf{x}$  como la velocidad  $\mathbf{u}$  son variables Markovianas, por lo tanto supone que únicamente el orden de magnitud de las aceleraciones de las fluctuaciones son infinitesimales en comparación a las advectivas. Este modelo está adecuado para describir la deriva de partículas en dinámicas oceánicas de meso escala sobre la superficie del océano.

En éste caso, el transporte de las partículas vendrá dado por (Spaulding et al. 2005):

$$\begin{aligned} dx &= (U + u)dt \\ du &= -(1/T)udt + K^{*1/2} dw^* \end{aligned} \quad (3.10)$$

Con condiciones iniciales predeterminadas  $u(0) = \hat{u}$ . El valor de  $\hat{u}$  se extrae de una distribución Gaussiana con media cero y varianza  $\sigma_u^2$ ,  $dw^*$  es también el incremento aleatorio de una distribución normal y  $T$  es la escala temporal de correlación Lagrangiana.

$K^*$  es el coeficiente de difusión y se expresa en términos de la varianza de la velocidad (Spaulding et al. 2005):

$$K^* = \sigma_u^2 / T \quad (3.11)$$

En este modelo se puede observar que las perturbaciones en el campo de velocidades en cada paso de tiempo se componen de un impulso aleatorio ( $dw^*$ ) y de una pérdida de velocidad ( $-(1/T)udt$ ) como efecto de la velocidad del instante previo que ha sido memorizada. De este modo la partícula retiene información de su velocidad turbulenta inicial durante un tiempo finito de orden la escala de correlación Lagrangiana  $T$ , característica del medio en el que se efectúa el estudio. Por lo tanto, trabajando con modelos tipo *Random flight* se pueden representar procesos con escalas de tiempos  $t < T$ .

El desplazamiento promedio (con respecto a su origen) generado por la fluctuación en éste modelo puede ser calculado analíticamente como (Spaulding et al. 2005):

$$S_{RF} = 2Kt - 2KT(1 - e^{-t/T}) \quad (3.12)$$

Donde  $RF$  se refiere a las siglas de *Random Flight*. Como se puede observar la dispersión de partículas sigue una función exponencial. Comparando  $S_{RW}$  con  $S_{RF}$  se puede advertir que el modelo  $RF$  predice una dispersión menor que el modelo  $RW$  para  $t < T$ .

Existe un tercer modelo Markoviano en el cual se asume que tanto la posición  $\mathbf{x}$ , como la velocidad  $\mathbf{u}$  y la aceleración  $\mathbf{a}$ , son conjuntamente Markovianas. Este modelo se emplea para reproducir procesos que presentan fuertes vórtices que desempeñan un papel fundamental en el movimiento de las partículas. Para el desarrollo de este tercer modelo se requiere de abundante conocimiento de la dinámica de la zona de aplicación que en ocasiones es difícil de disponer y su implementación solo es justificable en caso de tratarse de estudios en escenarios en los que se desarrollen éste tipo de procesos abundantemente. En el presente trabajo no se considerarán escenarios de este tipo, por lo tanto no se profundizará en su configuración analítica.

### **3.4.1 Varianza de las fluctuaciones de las velocidades ( $\sigma_u^2$ ) y escala temporal de correlación Lagrangiana (T)**

Como se ha comentado con anterioridad, en cualquiera de los modelos Markovianos, el valor de la varianza de las fluctuaciones de las velocidades ( $\sigma_u^2$ ) y de la escala temporal de correlación Lagrangiana (T) recibe un valor determinado en función del escenario en el cual se pretenda hacer el ejercicio de previsión, es decir que la fluctuación de las velocidades asociadas a procesos turbulentos y el tiempo a partir del cual se considera que no existe correlación entre dos fluctuaciones consecutivas son característicos del medio en el cual se efectúe el estudio.

Si el flujo advectivo impera ampliamente sobre el flujo turbulento, el valor de la varianza de las fluctuaciones será pequeño, en cambio si las fluctuaciones de la velocidad asociadas al flujo turbulento tienen una magnitud del orden de las del flujo advectivo, el valor de  $\sigma_u^2$  será mayor.

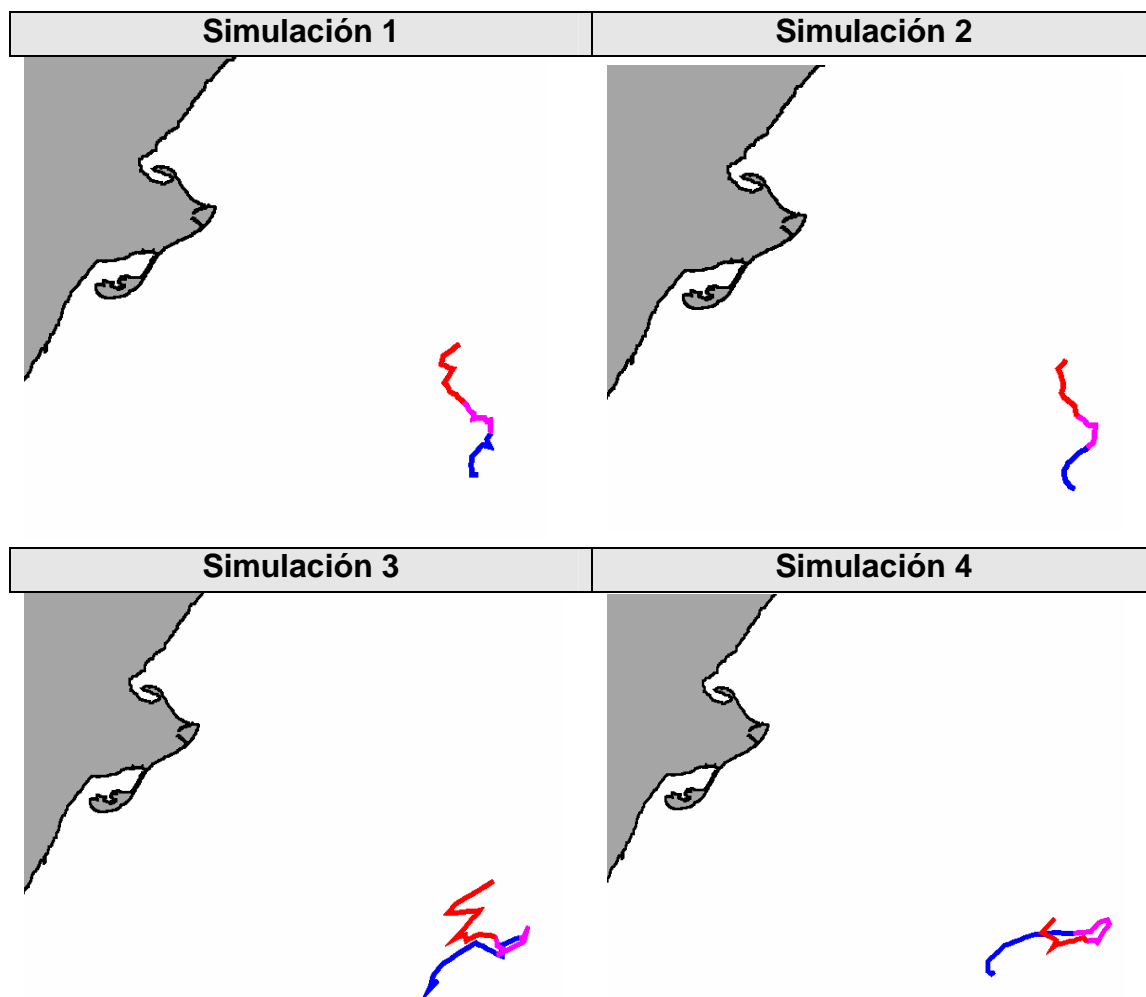
En cuanto al valor de la escala de correlación Lagrangiana (T), contra mayor sea su valor, la velocidad asociada al flujo turbulento en un instante  $t$  se verá influenciada por las velocidades comprendidas entre los instantes  $t-T$  y  $t$ , es decir, que la memoria que retiene información de las fluctuaciones de las velocidades del flujo turbulento durará un tiempo finito T. Es por eso que una vez escogido un paso de tiempo  $k$  para ejecutar el modelado numérico, se deberá proceder a efectuar la aproximación del flujo turbulento mediante un *Random Walk* en caso de que  $k < T$  y mediante un *Random Flight* en caso de que  $T > k$ .

A continuación se presentan resultados de una serie de simulaciones ejecutadas con la versión del programa MELT2DO con la que se ha trabajado en la confección de ésta tesina (Figura 3.3). En ellos se describe la trayectoria de una partícula que parte del mismo punto del espacio y en el mismo instante de tiempo y se ha visto sometida a los mismos forzamientos advectivos con el mismo paso de tiempo  $k=1800\text{seg}$ . En cambio la componente turbulenta de la velocidad se calcula con diferentes modelos Markovianos y con distintas varianzas de las fluctuaciones de las velocidades. En ellos

se puede comprobar que escoger una combinación adecuada de los factores que conciernen a la componente turbulenta de las velocidades repercute notablemente en la predicción. Las trayectorias que describe la partícula se representa en tres colores distintos que representan azul las primeras 24h, magenta las segundas 24h y rojo las terceras, por lo tanto, la simulación es una previsión a +72h.

La simulación 1 se trata de una simulación efectuada con un modelo Markoviano *Random Walk*, con  $T=21600$  seg y con desviación típica de las fluctuaciones de 0,05. Se puede comprobar que no existe memoria ya que las perturbaciones del flujo turbulento son bruscas y completamente aleatorias, pero en cambio tienen magnitud relativamente pequeña.

La simulación 2 se ha efectuado mediante un modelo *Random Flight*, con el mismo valor de  $\sigma_u$  que en la Simulación 1 y con valor de de la escala de correlación Lagrangiana  $T=21600$  seg. Como se puede observar, al ser la magnitud de  $\sigma_u$  pequeña, las perturbaciones del flujo turbulento no alteran apenas la trayectoria, pero en cambio, al tratarse de un *Random Flight*, los cambios de dirección son mucho más suaves.



**Figura 3.3:** Simulaciones con diferentes Modelos Markovianos y diferentes  $\sigma_u^2$

Para la realización de la simulación 3 se ha empleado un modelo *Random Walk* donde  $\sigma_u$  toma un valor de 0.15 y T de 21600 seg. En esta representación, se observa claramente que el orden de magnitud de las fluctuaciones es mucho mayor que en las simulaciones 1 y 2,. Además obedece al comportamiento completamente aleatorio que se espera de un modelo markoviano *Random Walk* con desviaciones de dirección bruscas y pronunciadas.

En la simulación 4 se ha hecho uso del modelo *Random Flight*, pero en este caso con desviación típica de las fluctuaciones ( $\sigma_u$ ) de 0,15 y T= 21600 seg. En éste caso la velocidad asociada al flujo turbulento también experimenta fluctuaciones de gran importancia, pero al contrario que en la simulación 3 los cambios de dirección asociados son mucho mas suaves.

Analizando los resultados obtenidos es sencillo advertir que escoger una combinación adecuada de modelos y parámetros para un escenario determinado será fundamental para la obtención de unos resultados predigan de manera fiable el desplazamiento de una partícula en el mar. Como veremos a lo largo de las siguientes líneas, para proceder al análisis de los casos que conciernen el estudio de esta tesina se definirá un escenario que se enmarca en la costa catalana y en el cual los valores de T y de  $\sigma_u^2$  tomarán un valor concreto extraído de un análisis previo que ha sido objeto de estudios en la zona (Madrugal, comunicación personal)

### 3.5 Implementación numérica en el modelado

El procedimiento utilizado para la discretización de las ecuaciones que gobiernan la deriva de un hidrocarburo sobre la superficie del mar se presenta a continuación. En el presente trabajo se va a trabajar con *Random Flight* dado que la escala de correlación temporal Lagrangiana característica del escenario (Mar catalana-Balear) es de 3600 segundos mientras que el paso de tiempo dt es de 1800 segundos. De este modo se va a mostrar la aproximación para éste modelo Markoviano concreto.

En ésta aproximación, las simulaciones de hidrocarburos se representan, por un conjunto discreto de partículas, cuyo comportamiento es independiente unas de otras. En cada iteración o paso de tiempo, la posición de las partículas es actualizada, añadiéndole un desplazamiento diferencial, debido a un termino determinístico advectivo y a un término estocástico difusivo según las ecuaciones 3.13 y 3.14:

$$\begin{aligned} x_i^{n+1} &= x_i^n + \Delta x_i^n = x_i^n + (u_i^n + u_i'^n) \Delta t \\ y_i^{n+1} &= y_i^n + \Delta y_i^n = y_i^n + (v_i^n + v_i'^n) \Delta t \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} u_i'^{n+1} &= u_i'^n - (1/T) u_i'^n \Delta t + (2\sigma_u^2 / T)^{1/2} w^n * \\ v_i'^{n+1} &= v_i'^n - (1/T) v_i'^n \Delta t + (2\sigma_v^2 / T)^{1/2} w^n * \end{aligned} \quad (3.14)$$

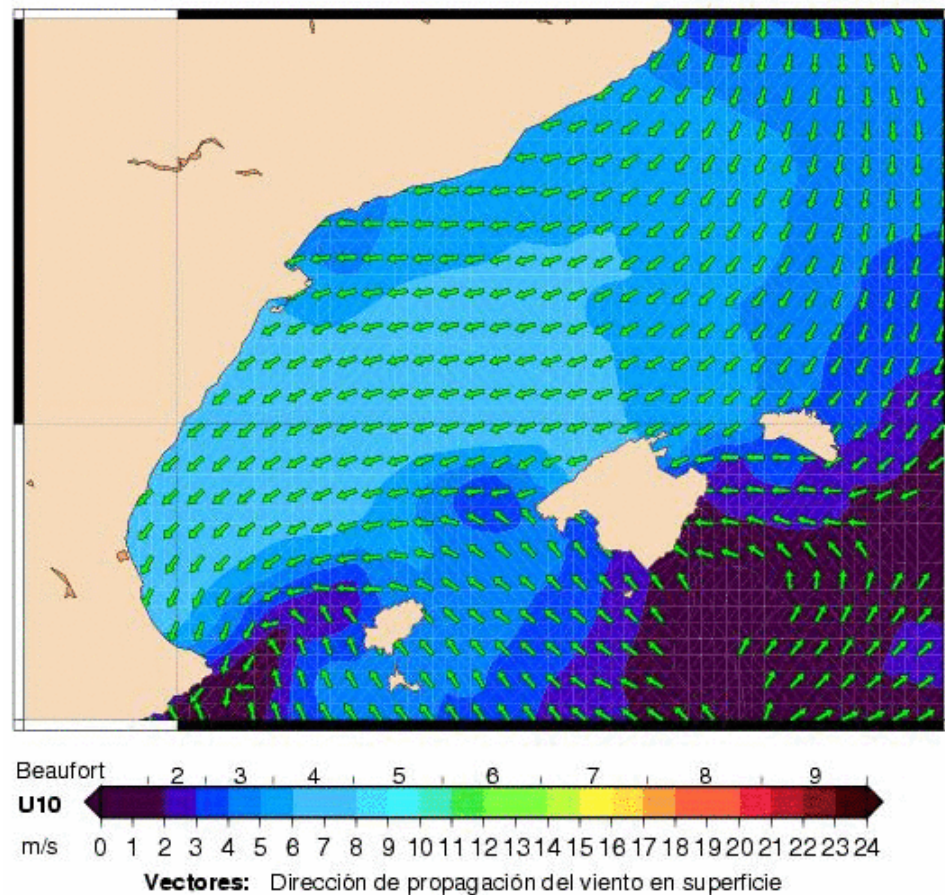


- $(x,y)_i^{n+1}$  se trata de la posición de la partícula  $i$  en el instante  $t=n+1$
- $(x,y)_i^n$  se trata de la posición de la partícula  $i$  en el instante  $t=n$
- $(u,v)_i^n$  es la componente advectiva de la velocidad en la posición  $i$  en el instante  $t=n$  en m/s
- $(u',v')_i^n$  es la componente de la fluctuación turbulenta de la velocidad en la posición  $i$  en el instante  $t=n$  en m/s
- $(u',v')_i^{n+1}$  es la componente de la fluctuación turbulenta de la velocidad en la posición  $i$  en el instante  $t=n+1$  en m/s
- $(\sigma_u^2, \sigma_v^2)$  es el valor de la varianza de las fluctuaciones en cada dirección, que será un parámetro característico del escenario de estudio.
- $T$  es el valor de la escala de correlación Lagrangiana en seg, cuyo valor dependerá de las características del medio donde se realice la simulación.
- $w^{n*}$  es un incremento aleatorio de una distribución normal con media cero y varianza  $2dt$

En un ciclo computacional, una partícula es seleccionada y las ecuaciones 3.13 se solucionan para determinar la posición de la partícula en el instante  $n+1$ . Para el primer paso  $(x,y)_i^n$  tiene un valor prescrito y el valor del término turbulento  $(u',v')_i^n$  se selecciona aleatoriamente de la distribución normal. Las ecuaciones 3.14 se solucionan para determinar el valor de la componente de la velocidad turbulenta en el instante  $t= n+1$   $((u',v')_i^{n+1})$ . En el siguiente paso de tiempo, este valor se sustituye por  $(u',v')_i^n$  en la ecuación 3.13. Esta secuencia de cálculo se repite para predecir la posición de cada partícula en el tiempo.

El término advectivo en cambio se debe evaluar para cada partícula: a partir del campo de velocidades determinado previamente, se interpolan las velocidades en las posiciones de cada partícula. El campo de velocidades de los vientos y de las corrientes se obtendrá en nuestro caso a partir de sistemas operacionales existentes como Puertos del Estado ([www.puertos.es](http://www.puertos.es)) o el *spin-off* de la UPC SIMO (Soluciones de ingeniería marítima operacional ([www.simo.cat](http://www.simo.cat))). De este modo, cada organización puede suministrar un campo de velocidades discretizado mediante una malla euleriana particular que permitirá efectuar predicciones numéricas del término advectivo a una escala temporal y espacial predeterminada, es decir, con un ámbito específico (Mediterráneo, Golfo de Vizcaya, etc.), con un horizonte operacional determinado (+24,+48 o +72h) y con resultados cada  $n$  horas. Estas predicciones tienen una resolución fijada que permite un detalle espacial establecido.

En la Figura 3.4 se muestra un mapa de predicción del forzamiento viento que suministra Puertos del Estado. En él, cada vector representa la dirección y la intensidad del viento en superficie ( $w_{10}$ ) en cada nodo de la malla. El ámbito es Catalunya, Levante y Baleares, dispone de valores para cada 3 horas y el horizonte de predicción es de 72 horas.



**Figura 3.4:** Mapa de predicción del forzamiento viento.

Fuente: [www.puertos.es](http://www.puertos.es)

Estas mallas eulerianas te proporcionan el valor de la velocidad del viento y de las corrientes en cada nudo de la malla y cada  $x$  horas, de modo que para obtener la velocidad en el lugar del espacio-tiempo que se desee se debe interpolar. Además, la resolución específica de la malla de vientos no tiene porque ser la misma que la de corrientes. Es decir, cada vez que el programa se dispone a calcular la componente advectiva de la velocidad procede de la siguiente manera:

- 1) el programa identifica la fecha en la cual ha sucedido el vertido
- 2) automáticamente acude a las respectivas mallas de vientos y corrientes y coloca el primer paso de la iteración temporal justo en la fecha anterior con datos de vientos y corrientes.
- 3) Establece los dos instantes inmediatos de los que se dispone de datos e interpola las mayas obteniendo como resultado un campo de vientos y otro de corrientes de todo el dominio pero fijado en la fecha de estudio
- 4) A continuación se procede a identificar entre que 4 nodos de cada malla se encuentra la partícula en cuestión

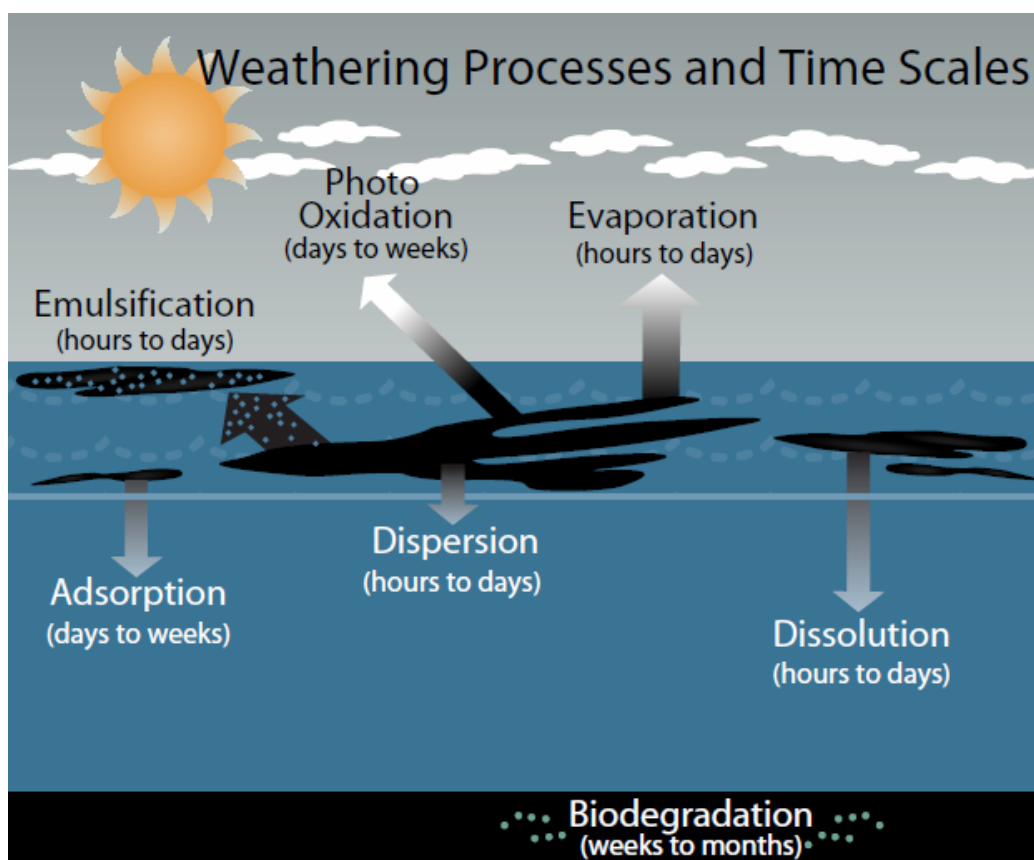
- 5) Una vez se determinan los 4 nodos se interpola y se obtiene la velocidad de arrastre del viento sobre la mancha ( $U_{wo}$ ,  $V_{wo}$ ) y la velocidad de las corrientes superficiales ( $U_s$ ,  $V_s$ ). Sumándolas se obtiene el valor de la componente advectiva de la velocidad en el instante y posición especificados.

### 3.6 Procesos de envejecimiento de los Hidrocarburos (weathering)

Una vez analizadas en profundidad las componentes advectivas y difusivas que gobiernan la deriva de los hidrocarburos en el mar, la importancia de los diferentes parámetros que parametrizan sus aproximaciones y su implementación en el modelado, se procede a indagar en los procesos físico-químicos que intervienen en el envejecimiento del mismo.

En general todos los hidrocarburos tienen un comportamiento muy particular una vez derramados al medio marino. Su composición varía a lo largo del tiempo y los agentes externos alteran sus propiedades físicas.

Como se ha comentado con anterioridad, los hidrocarburos son contaminantes no conservativos que interactúan parcialmente con el medio marino. Para poder prever su comportamiento deberemos analizar los principales procesos de tipo físico-químico que intervienen en el envejecimiento.



**Figura 3.5.** Principales procesos de *envejecimiento* de los hidrocarburos y sus escalas temporales.  
Fuente: [www.noaa.gov](http://www.noaa.gov)

A continuación se procede a efectuar una breve descripción de los principales factores que intervienen en el *envejecimiento* (Ver figura 3.5), definir cuales son sus condicionantes y establecer el intervalo temporal en el cual se da el proceso. No se profundizará en su expresión analítica puesto que ello no se encuentra entre los objetivos del presente trabajo.

### 3.6.1 Esparcimiento (*Spreading*)

Cuando un líquido más ligero es derramado sobre otro, se produce un esparcimiento natural espontáneo producido por una serie de fenómenos físico químicos. Tras el vertido de hidrocarburos al mar, estos productos se esparcen rápidamente en la superficie, pudiendo llegar a abarcar áreas muy extensas incluso en condiciones de calma. Este esparcimiento es debido a un desequilibrio de fuerzas internas y externas y se denomina esparcimiento mecánico. Lleva este nombre para distinguirlo de los procesos de extensión difusiva.

El proceso de esparcimiento evoluciona temporalmente hasta llegar a un estado en el cual el espesor de la capa llega al denominado espesor mínimo a partir del cual, el esparcimiento mecánico cesa. Este espesor es característico de cada producto petrolífero y depende de su viscosidad y de su densidad.

Una vez alcanzado el espesor mínimo, debido a los procesos propios de envejecimiento o por una fuerte turbulencia del medio, la mancha en superficie se puede fragmentar en pequeñas sub-manchas como se puede apreciar en la figura 3.6.



**Figura 3.6:** Fenómeno de fragmentación de la mancha de petróleo.  
Fuente: Huffington post

Éste fenómeno tiene una relevancia relativa en mar abierto pero es el principal fenómeno de expansión en aguas abrigadas de cara a una posible actuación, ya que el espesor mínimo se puede alcanzar en menos de un día.

### 3.6.2 Evaporación

El petróleo natural y sus refinados están constituidos por una mezcla de varios hidrocarburos, unos más volátiles que otros. Inmediatamente tras el derrame, las componentes mas ligeras se evaporan En la medida que esto sucede, el petróleo se hace más denso y viscoso pudiendo llegar a hundirse. Igualmente éste fenómeno hace que el hidrocarburo sea más susceptible a emulsionarse.

Este proceso además de depender de la composición del hidrocarburo, también lo hace de las condiciones del medio y de la extensión superficial de la mancha, ya que a mayor extensión y/o menor espesor más rápido se produce la evaporación.

La evaporación empieza inminentemente tras en derrame, prolongándose desde unas pocas horas a unos cuantos días según el producto. El porcentaje de eliminación del volumen derramado (tasa de evaporación) es un aspecto que también depende del tipo de hidrocarburo; este porcentaje alcanza un máximo (tasa máxima de evaporación) que oscila entre el 100% en los productos mas ligeros y apenas el 10% para los fuel-oils pesados.

El viento en superficie, la temperatura y la exposición solar también son agentes que alteran la velocidad con la que el producto derramado se evapora. A mayor Temperatura más rápidamente se alcanza la tasa máxima de evaporación y a mayor viento, mayor efecto de arrastre, mayor transferencia de masa fluido-gas y por lo tanto mayor velocidad de evaporación.

Un buen conocimiento sobre la evolución de éste proceso se presume esencial de cara a la gestión de un suceso, en especial las horas inmediatas del mismo ya que en ese preciso instante es necesario conocer la cantidad de producto que se evaporará y la cantidad que permanecerá en el medio. Asimismo, la propia evaporación interactúa significativamente con el resto de reacciones fisico-químicas del *envejecimiento*, provocando cambios en la reología del producto derramado.

### 3.6.3 Emulsionado

La energía del oleaje mezcla de forma espontánea el hidrocarburo con el agua marina, formándose en ocasiones una emulsión “agua-en-aceite” (Ver figura 3.7). Este proceso afecta a los productos pesados y es inexistente en productos ligeros. El nuevo producto agua+hidrocarburo tendrá mayor densidad que la inicial, su viscosidad se verá aumentada drásticamente y será más inalterable frente a efectos externos.

En el contexto de un suceso de vertido de hidrocarburo en el mar, este proceso se considera crítico en cuanto a su recuperación se refiere, ya que si la viscosidad del producto aumenta excesivamente, el bombeo resulta impracticable. En ciertos casos, se alcanzan proporciones de agua en la mezcla de hasta el 80%, llegando a multiplicar el volumen de contaminante por cinco.





**Figura 3.7:** Petróleo vertido por el accidente de BP golfo de mexico; Izda petroleo emulsionado y Dcha efecto del oleaje como energía de mezclado.

Fuente: Huffington post

Esta emulsión también reduce las posibilidades de tratar la mezcla con dispersantes u otros productos, resultando mucho más resistente a los lentos procesos de biodegradación y por lo tanto de asimilación natural en el medio dañado. Otro factor a tener en cuenta es que la mezcla emulsionada de agua aceite, en su desplazamiento superficial por el mar, va incorporando todo tipo de partículas, objetos y sedimentos hasta llegar a la costa, donde se acaba mezclando con la arena de costa. Así, desde que el hidrocarburo se vierte hasta que se recupera en la costa, el residuo puede llegar a multiplicar su volumen por diez.

### 3.6.4 Biodegradación

La biodegradación es un proceso natural en el cual los microorganismos descomponen los hidrocarburos en compuestos más sencillos. El crudo es un producto que se encuentra de forma natural en el medio; es normal que ciertas especies de bacterias marinas, hongos y otros organismos sean capaces de descomponer los hidrocarburos para utilizarlos como fuente de alimento. Es un proceso natural y muy lento debido al agotamiento continuo de oxígeno y nutrientes, a la formación de emulsiones de agua en petróleo y puede estar limitada por la presencia en el producto de compuestos tóxicos

La tasa de biodegradación depende del contenido de nutrientes (nitrógeno y fósforo), oxígeno disuelto, salinidad, área superficial del derrame y de la composición y tamaño de la población microbiana.

Existen diversas técnicas para potenciar y favorecer esta degradación, la más usual es añadir artificialmente nutrientes para las bacterias. Como regla general, el porcentaje de eliminación del volumen derramado en esta degradación va desde el 50% para productos ligeros a apenas un 5% para productos pesados.

### 3.6.5 Foto-oxidación

La radiación ultravioleta solar produce la oxidación fotoquímica, dependiendo de la intensidad de la radiación solar. Esta acción altera las propiedades físico-químicas de los productos petrolíferos modificando su estructura química, lo que implica una

estabilización de las emulsiones La combinación química de hidrocarburos con el oxígeno atmosférico y contribuye a la descomposición o degradación final del petróleo. Cuanto más área expuesta exista, mayor será la oxidación y mayor la velocidad de degradación. Este proceso es lento puesto que sólo una pequeña cantidad de oxígeno puede penetrar en una mancha de petróleo.

### 3.6.6 Disolución

Este proceso es aquel por el cual las fracciones solubles del hidrocarburo se disuelven en el volumen de la columna de agua y en los alrededores del derrame. El tiempo de disolución depende de la composición, tasa de esparcimiento, temperatura del agua, turbulencia y grado de dispersión.

Aunque el proceso comienza inmediatamente, se manifiesta de manera mas significativa a largo plazo y continúa durante todo el proceso de degradación del hidrocarburo. Los compuestos más ligeros son los más solubles en el agua marina y por lo tanto los que pueden aumentar la toxicidad del medio acuoso con mayor rapidez, ya que son los que se incorporan a la columna de agua de manera inmediata.

El porcentaje de eliminación del volumen derramado en esta degradación suele ser poco importante (<5%) o incluso inexistente en función de la presencia de fracción soluble.

### 3.6.7 Embarrancamiento

En el momento en el que el contaminante llega a la costa se puede embarrancar en las playas, rocas, rompeolas, acantilados o simplemente puede quedar retenido en condiciones de mar en calma hasta que éstas cambien y lo devuelvan mar adentro. En la figura 3.8 se puede observar petróleo embarrancado debido al suceso ocurrido en 2010 en el golfo de Mexico.



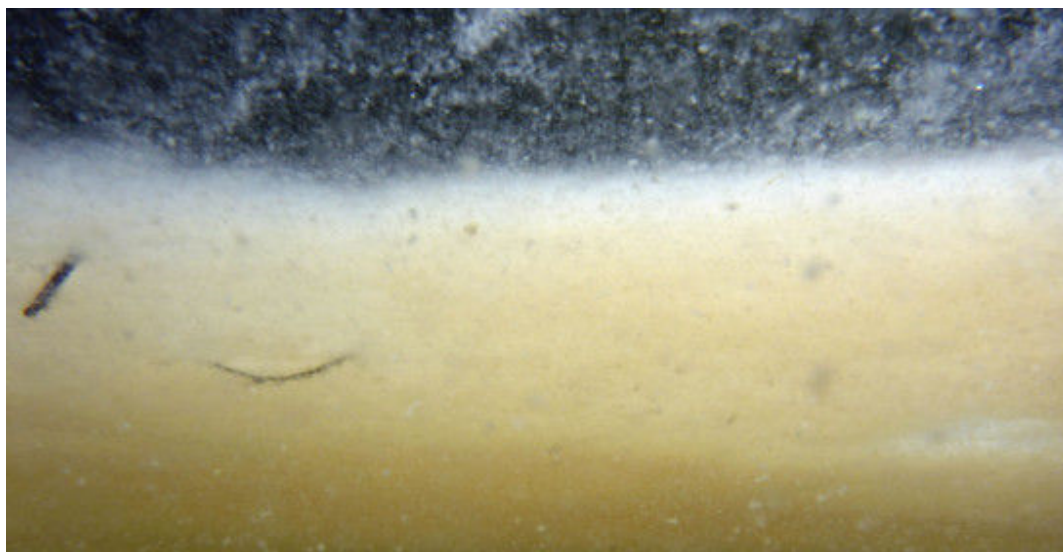
**Figura 3.8:** Petróleo embarrancado en la desembocadura del río Mississippi, (EEUU) vertido por el accidente de BP en el golfo de Mexico (2010). Fuente: [www.greenpeace.org/international](http://www.greenpeace.org/international)

### 3.6.8 Sedimentación

Puede suceder por dos mecanismos: el primero se define en la medida que el hidrocarburo se degrada resultando en un incremento de su densidad respecto al agua circundante o simplemente entra en contacto con aguas menos densas. El segundo ocurre por la adhesión de las partículas suspendidas en la columna de agua al petróleo. En ambas circunstancias el contaminante puede precipitar al fondo, incorporando en la mezcla todos los sedimentos o partículas en suspensión.

### 3.6.9 Dispersión vertical

La dispersión vertical se trata de la penetración en forma particulada del contaminante en la columna de agua, formando lo que sería una emulsión de petróleo-en-agua. Esta intrusión se realiza a partir del fraccionamiento de la capa superficial del contaminante en partículas de diferentes tamaños que serán dispersadas en la columna gracias a la turbulencia del océano y a las corrientes marinas (Ver figura 3.9). Este proceso puede llegar a ser muy importante, ya que, en ciertos casos el volumen dispersado en la columna de agua puede llegar a ser del 60%.



**Figura 3.9:** En esta imagen se puede observar la dispersión vertical del hidrocarburo.  
Fuente: Huffington post

El petróleo y sus derivados son generalmente más ligeros que el agua marina, siendo además inmiscibles. Debido a la flotabilidad de las gotas del petróleo, estas pueden remontar a la superficie, concentrándose de nuevo en la mancha original o formando una nueva. De esta forma, la evolución de la forma de dispersión en la columna de agua dependerá fundamentalmente de la turbulencia del medio y de la densidad del producto.

El proceso de dispersión puede producirse de forma natural, debido a la turbulencia del oleaje, o de forma inducida, debido a la utilización de productos químicos que favorecen la generación y estabilización de partículas más pequeñas. Éste proceso ha



generado controversia en la historia de la gestión de vertidos, ya que a raíz de la intervención y control de la contaminación producida por ciertos accidentes, se limitó el uso de estos productos químicos, de mayor toxicidad que el producto derramado inicialmente, poniendo en juego la conservación del medio marino.

En la actualidad, esta actuación se aplica en casos puntuales, en derrames alejados de la costa puesto que no se conocen las consecuencias reales de la dispersión en la columna de agua: incorporación en la cadena trófica, acumulación e el fondo por sedimentación etc.

Estudios experimentales sobre dispersión vertical en el océano realizados por Delvigne y Hulsen (1994) determinaron que la intrusión de partículas de petróleo venía dado por su relación con parámetros tales como la temperatura, la viscosidad del petróleo, el espesor de la mancha superficial y las condiciones de turbulencia.

Es un tema de actualidad el hecho de que se puede producir un vertido en profundidad de algún producto petrolífero en lugar de en superficie. Este es el caso del dramático accidente que ha tenido lugar de la plataforma petrolífera de *British Petrol (BP)* en el golfo de México en 2010 en el cual, accidentalmente están accediendo a la columna de agua productos del yacimiento (Ver figura 3.10). En estos casos, Por un lado el producto derramado se mezcla instantáneamente con el agua circundante generándose nuevos compuestos y por otro, la evolución del afloramiento es más difícil de evaluar, puesto que el producto no está inicialmente particulado (Mestres, 2002).



**Figura 3.10:** Imagen de la explosión en la plataforma petrolífera de BP.

Fuente: <http://www.nationalgeographic.com.es>

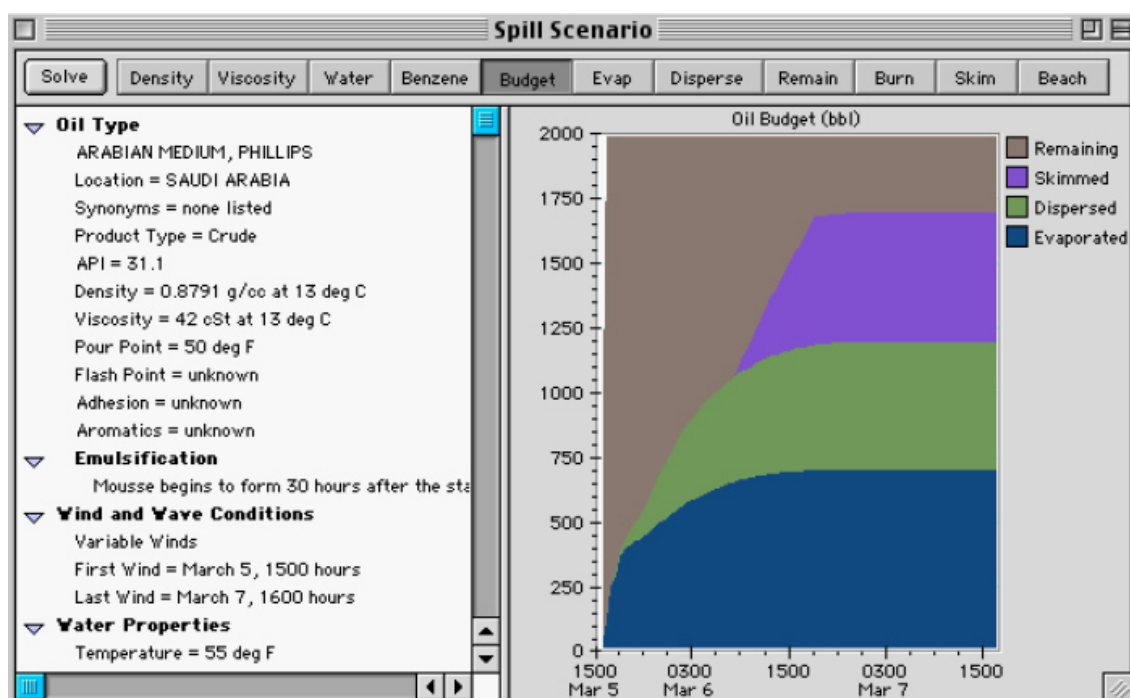
### 3.6.10 Bases de datos

Como se puede observar, el análisis de la mayoría de estos procesos de envejecimiento y degradación debe nutrirse tanto de una serie de propiedades características concretas del producto vertido como de herramientas para predecir su posible evolución temporal. Es fundamental disponer de una mínima información del producto derramado para realizar una gestión de un vertido de manera eficaz.

Factores como la densidad, la viscosidad, o los umbrales de las diferentes reacciones (por ejemplo la tasa máxima de evaporación o de emulsionado) son parámetros que han sido estudiados a lo largo de los últimos decenios bajo diferentes condiciones. Haciendo acopio de los resultados se puede generar una base de datos que se presume imprescindible de cara a abastecer de datos a los submódulos de *envejecimiento* de los modelados de *oilspill*. Estos datos aportan una información sobre dos aspectos del envejecimiento. Por un lado, conocer la cinética de las reacciones químicas, es decir, su intensidad y duración en función de las condiciones del entorno (viento, temperatura, etc.) y por otro la interacción entre los diferentes procesos de *envejecimiento* (como afecta la evaporación sobre el emulsionado, etc.) y los cambios en la reología.

Actualmente existen diversas bases de datos en relación a los diferentes tipos de hidrocarburos. Algunas de ellas están enfocadas o elaboradas por las propias compañías petrolíferas, centrándose en las propiedades que se presumen importantes para los adquirentes como la composición. Existen relativamente pocas en las que se haya hecho un estudio exhaustivo sobre la reología del producto, de cara a su tratamiento o recuperación en caso de derrame. Seguramente la base de datos elaborada por la “*National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*” sea actualmente la mas completa en éste sentido.

La base de datos generada por el NOAA es la base de datos recopilada para el modelo ADIOS2, y como se puede ver en la figura 3.11, se trata de un programa de transformaciones químicas que fue compilado de manera multilateral por diversas entidades internacionales, entre ellas el departamento de Medio Ambiente de Canadá, el Departamento de Energía los EE.UU., la Organización Internacional de Compañías Petroleras “CONCAWE” (CONservation of Clean Air and Water in Europe). La información que incorpora ésta base de datos incluye densidad, viscosidad, temperatura de inflamación, los grupos de hidrocarburos del tipo de petróleo, la dispersabilidad y los datos de destilación en función de la ubicación de la extracción del mismo.

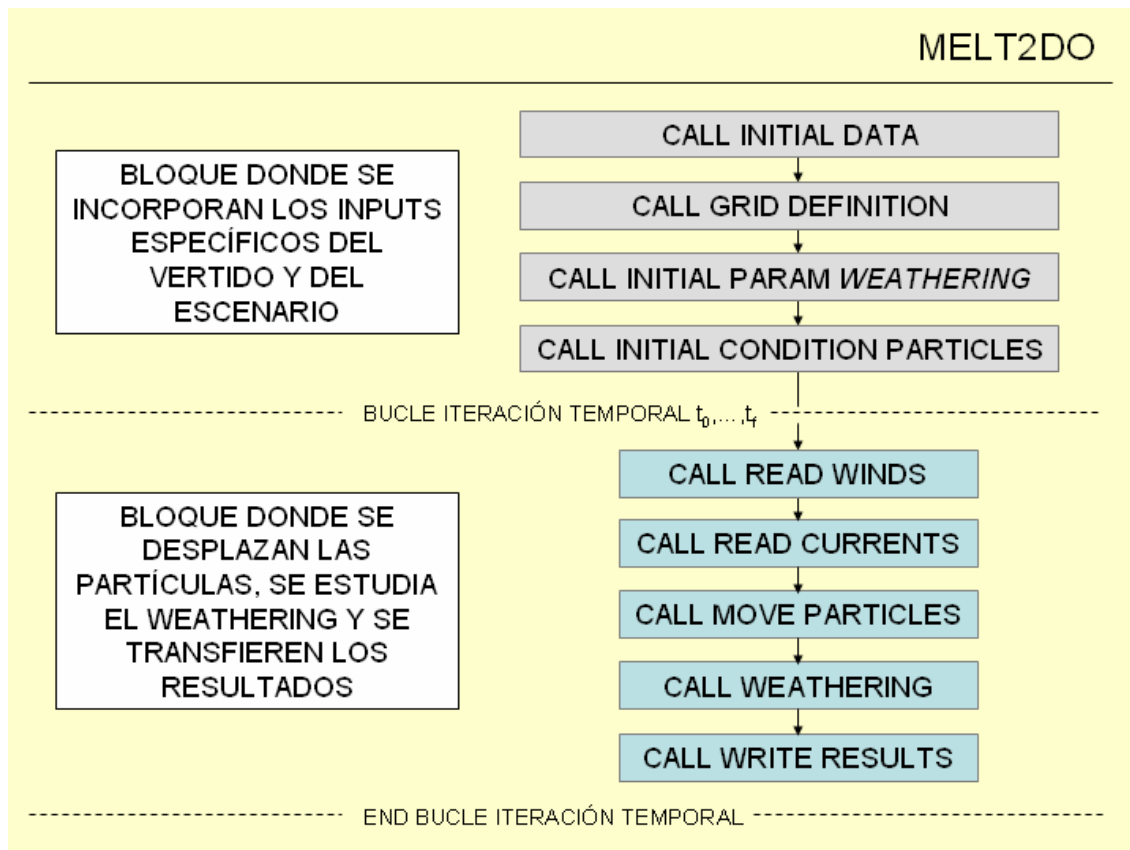


**Figura 3.11:** Ejemplo de proceso de transformación del petróleo modelado por el programa ADIOS2.  
Fuente: NOAA

En el Modelado numérico que desarrolló Comerma (2004) en su tesis doctoral, se adjuntó un módulo de *envejecimiento* en el cual se implementaron las formulaciones los procesos más significativos descritos con anterioridad. En la versión del programa MELT2DO con la que se ha trabajado en la confección del presente trabajo, el módulo de *envejecimiento* no se encuentra habilitado ya que el gasto computacional que conllevaría habilitarlo es prescindible. Esto es así porque hacer un análisis del módulo de envejecimiento no se encuentra entre los objetivos de esta tesina y porque se ha considerado que la interacción de la degradación del hidrocarburo sobre el transporte no es significativa si nos ceñimos a los objetivos concretos que se pretenden alcanzar siguiendo las directrices de éste estudio. Por ello se ha procedido introduciendo una breve explicación de los principales procesos de degradación de un hidrocarburo sin entrar en la expresión analítica que gobierna la cinética y la magnitud de los mismos.

### 3.7 Diagrama de flujo del programa MELT2DO

A continuación se presenta un diagrama de flujo (Figura 3.12) de la versión del programa METLT2DO mediante el cual se han efectuado el conjunto de las simulaciones que se han realizado durante el desarrollo de esta tesina.



**Figura 3.12:** Diagrama de flujo del programa MELT2DO

A continuación se presentan las subrutinas más importantes del modelado MELT2DO y se introducen las funciones específicas de cada una de ellas. También se mencionan los parámetros más determinantes que se tienen que introducir previamente a una simulación. Tal y como se puede observar en el diagrama de flujo en la figura 3.12, las subrutinas están explicadas con un orden que coincide con la secuencia temporal del modelado.

#### *Initial data*

En esta subrutina se incorporan al programa una serie de datos y de parámetros que caracterizan el vertido y lo enmarcan en su escenario concreto. Estos datos son los siguientes:

- Fechas de inicio-final de la simulación
- Tipo de hidrocarburo
- Duración del vertido
- Se determina si se va a hacer una predicción *backward* o *forward*
- El paso de tiempo de la integración temporal
- Se pueda activar y desactivar el módulo de *envejecimiento*
- Se pueden activar o desactivar uno a uno los forzamientos de la componente advectiva del transporte.
- Se identifica la fuente de predicciones de vientos y corrientes para caracterizar la malla.

- Se imponen las coordenadas de los diferentes puntos del vertido, el radio y el número de partículas que discretizarán el sistema.
- El factor de arrastre de viento y el factor de arrastre de corrientes
- El modelo Markoviano con el que se simulará la componente difusiva del transporte. (*random walk o random flight*)
- La escala de correlación Lagrangiana y la Desviación estándar de las fluctuaciones de velocidad (factor turbulento).

#### *Grid definition*

En esta subrutina se establecen los parámetros que caracterizan las mallas donde han sido calculadas las predicciones de vientos y de corrientes. A su vez también se identifica el campo de forzamientos inmediatamente anterior al suceso para empezar la integración.

#### *Inicial param envejecimiento*

Se identifica el tipo de Hidrocarburo que se ha vertido y se acude a una base de datos (por ejemplo la de ADIOS2) para definir los valores de las características del producto. Como se ha comentado con anterioridad, el módulo de *envejecimiento* en la versión con la que se ha elaborado este trabajo siempre ha estado desactivado.

#### *Inicial condition particles*

Se procede a distribuir aleatoriamente las partículas dado un radio y una posición inicial del vertido. Esta subrutina también identifica que la posición inicial de las partículas no esté fuera del dominio donde existen predicciones de vientos y de corrientes y que no estén en tierra

#### *Read winds*

En esta subrutina se leen los campos de vientos correspondientes a los dos instantes inmediatos anterior y posterior al instante en el cual se evalúa el transporte de las partículas. Una vez identificados se interpola y se procede así a lo largo de todo el proceso de iteración temporal.

#### *Read currents*

Ídem que en el anterior pero en lugar de campos de vientos se trata de campos de corrientes.

#### *Move particles*

En esta subrutina se encuentra el bucle de iteración espacial para identificar en que lugar se encuentra la partícula y aplicarle los forzamientos de la componente advectiva y las fluctuaciones de la componente turbulenta del transporte. La componente advectiva vendrá dada por los campos de

velocidades de vientos y corrientes, y por lo tanto se interpolan los valores de los nodos de la celda concreta donde se encuentra en ese instante la partícula. Este proceso se realiza para todas las partículas mediante el bucle.

#### *Call envejecimiento*

En esta subrutina se aplican los diferentes procesos de envejecimiento al hidrocarburo; Emulsionado, Evaporación, Dispersión, etc. En cualquier caso, como ya se ha mencionado anteriormente, no se ha hecho uso de esta subrutina a lo largo de la confección del presente trabajo.

#### *Write results*

Mediante esta subrutina se generan unos archivos en los cuales vienen representadas las trayectorias de las diferentes partículas a lo largo de todo el proceso de predicción.

#### *Graficador*

Para poder hacer un análisis cualitativo de los resultados obtenidos de las diferentes simulaciones realizadas, se ha acudido al graficador "Ghostscript" para representar las trayectorias de las partículas que emulan el vertido sobre un mapa del escenario del suceso.

## IMPLEMENTACIÓN DEL MODELADO DE RETROANÁLISIS. RESULTADOS

---

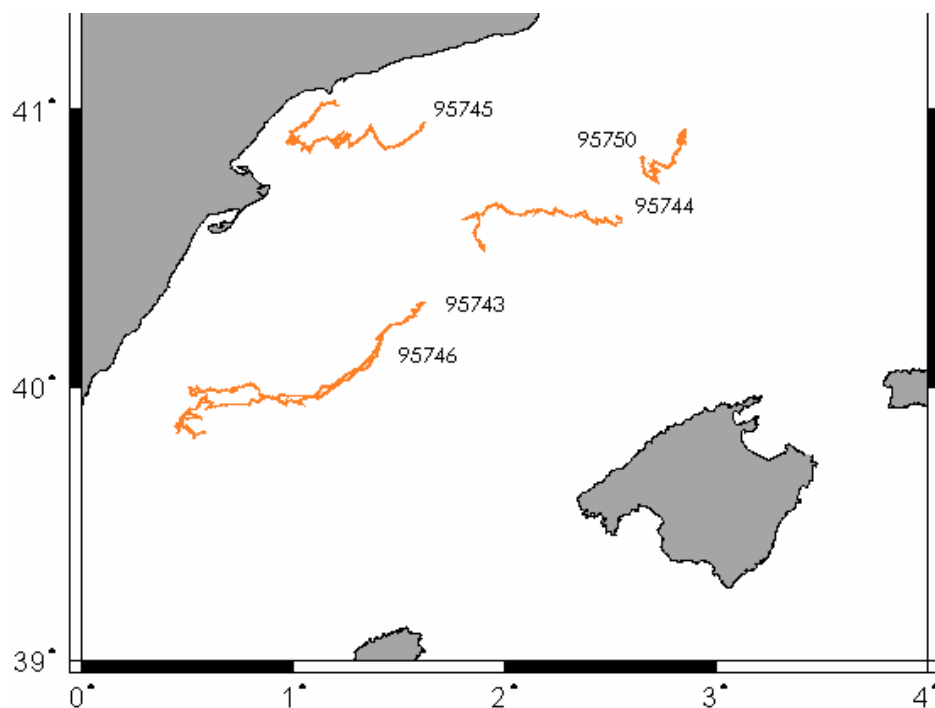
### *CAPÍTULO IV*

En el presente capítulo se aborda el objetivo fundamental del presente trabajo, que es el de implementar el Retroanálisis en el Modelado de transporte de hidrocarburos MELT2DO y posteriormente hacer un análisis del funcionamiento del mismo. Como ya se comentó con anterioridad, La posibilidad de ejecutar el programa hacia atrás en el tiempo supone una herramienta básica para perseguir los vertidos operacionales de des-lastrado, de *búnkering* y de limpieza de tanques. Para ello se precisará una calibración previa del modelado que enmarque la configuración de los parámetros mas determinantes en el escenario en el que se van a llevar a cabo las simulaciones necesarias para el análisis.

## 4.1 Análisis y contraste de las características del dominio de estudio

En este apartado se presenta una aplicación práctica del modelado en el escenario del Mar Catalano-Balear. El objetivo fundamental ha sido poner en relieve buena parte de los aspectos presentados en el capítulo anterior sobre el transporte superficial de hidrocarburos.

La elección del dominio de estudio viene dada por la posibilidad de poder contrastar los resultados con datos empíricos, Obtenidos gracias a el seguimiento de una serie de boyas Lagrangianas que se soltaron en este escenario enmarcadas en el proyecto de investigación AIDMAR. En un principio se liberaron un total de diez de estas boyas en dos lugares distintos del mismo escenario (cinco boyas en cada uno), pero debido a fallos de funcionamiento de las mismas y de los sistemas de oceanografía operacional disponibles, nos encontramos con que solo disponíamos de registros de cinco de ellas para cuatro días (96 horas) concretos, del 27 de Septiembre del 2009 al 1 de Octubre del 2009, como se puede ver en la figura 4.1.



**Figura 4.1:** Trayectorias de las boyas Lagrangianas del 27/09/09 al 1/10/09

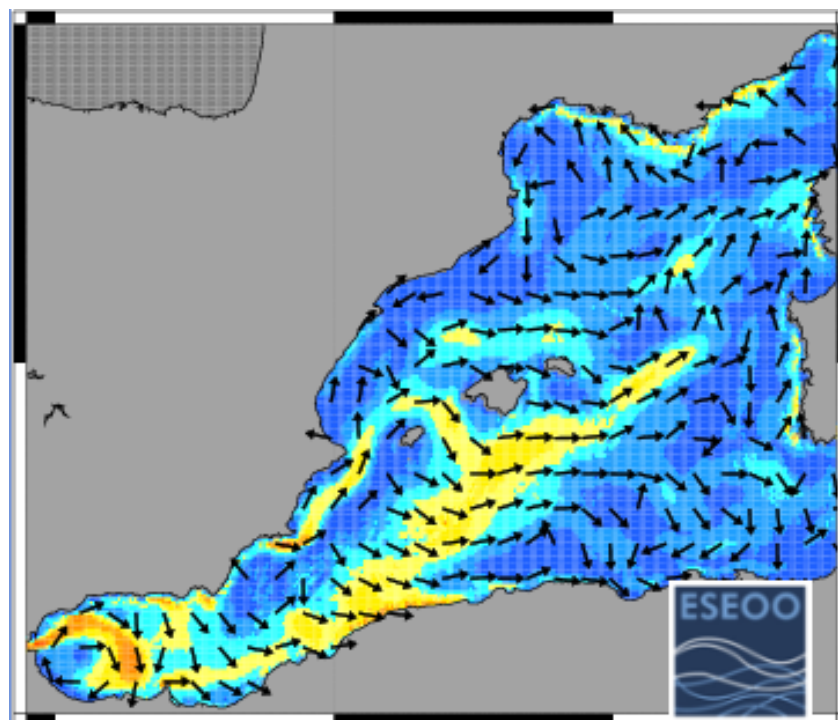


En la imagen anterior, se puede observar que el escenario de estudio es la parte del Mar Mediterráneo comprendida entre el Delta de l'Ebre i las islas Baleares, que a parte de tener un interés medioambiental especial por la presencia del Delta del Ebro, también es interesante por la proximidad de diversos centros de producción y tratamiento de productos petrolíferos que, por consiguiente, origina una concentración elevada de actividades marítimas relacionadas con el transporte y la extracción de hidrocarburos.

El objetivo que se persigue en este apartado es realizar una serie de simulaciones que representen vertidos virtuales en los lugares donde se lanzaron las diferentes boyas el día 27 de Septiembre y contrastarlos con las trayectorias de la deriva real. Este proceso se aborda asignando diferentes valores a los parámetros característicos del proceso de deriva del hidrocarburo y combinándolos durante la sucesión de simulaciones. De esta manera se podrá determinar que parámetros son más influyentes en el contexto de estudio y con que combinación de valores la aproximación del modelado se asemeja más a la deriva real tanto para el conjunto de las boyas como para cada una de ellas individualmente.

A continuación se muestran las condiciones de simulación, donde se presentan los valores que se han asignado a las variables con las que se han realizado las simulaciones:

- Como se comentó con anterioridad, las simulaciones transcurrirán entre el 27 de Septiembre del 2009 al 30 de Septiembre del 2009, ya que los ejercicios de predicción están concebidos como máximo para +72h
- El módulo de *weathering* permanecerá desactivado, por lo tanto no se contemplan los efectos de cambio propiedades físico químicas.
- El transporte se efectuará únicamente de manera superficial, por lo tanto el conjunto de partículas que representan el volumen total de cada vertido permanecerá constante a lo largo de cada simulación a no ser que entren en contacto con la costa o salgan del dominio de los campos de forzamientos advectivos.
- El paso de tiempo del programa es de 1800 segundos, pero en pantalla solo se reproducirán datos cada 3 horas para que las representaciones gráficas sean mas claras.
- El campo de predicción de velocidades de corrientes se obtiene del sistema ESEOO (Establecimiento de un Sistema Español de Oceanografía Operacional), concretamente de la zona del mediterráneo, el ESEOMED (Ver figura 4.2)



**Figura 4.2:** Campo de velocidades de los corrientes del ESEOMED. Fuente: <http://www.esooo.org>

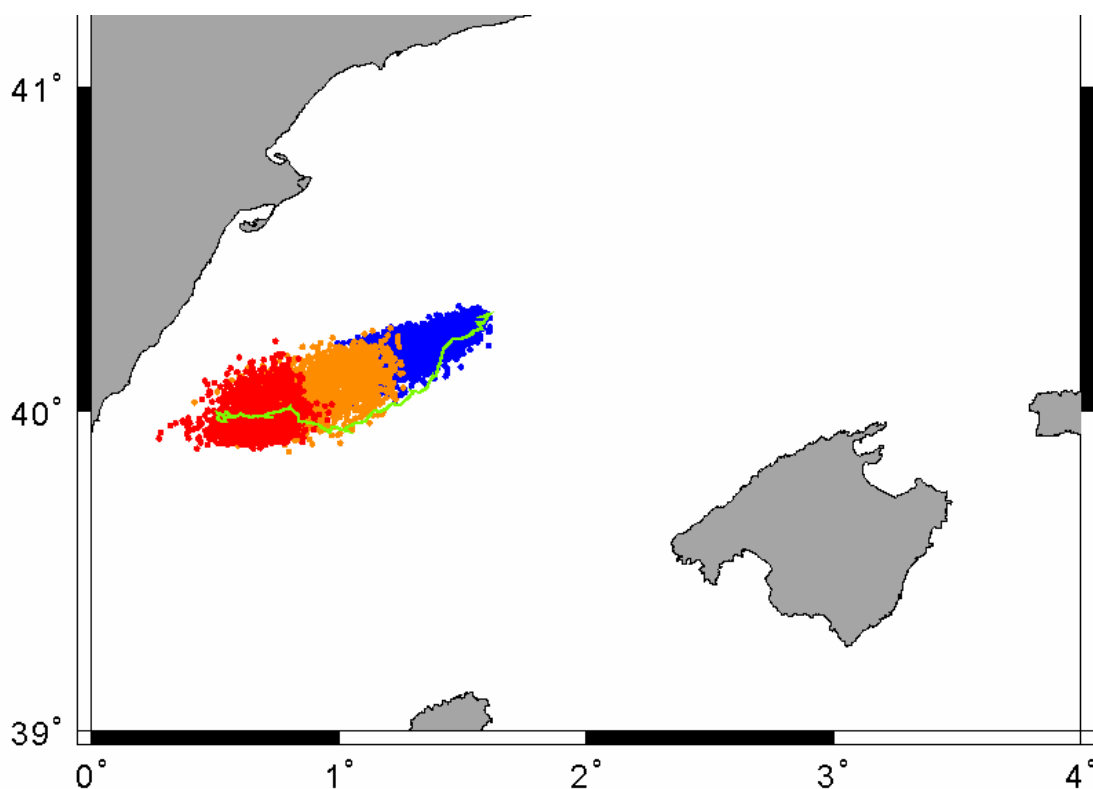
- El campo de predicción de velocidades de las vientos se obtiene de la Agencia estatal de meteorología (AeMet)
- El modelo estocástico Lagrangiano utilizado en las simulaciones es el Modelo Markoviano *Random Flight*
- La escala de correlación Lagrangiana en éste escenario se ha estimado de 3600 segundos. Como se puede observar el paso de tiempo es menor que el valor de la escala de correlación Lagrangiana, hecho que justifica que se emplee el *Random Flight*.
- La desviación estándar de las fluctuaciones de velocidades utilizada es de 0.1
- Se han dispuesto 4 grupos de partículas en lugar de 5 dado que las trayectorias de las boyas 95743 y 95746 (Ver figura 4.1) prácticamente se superponen y sería imposible determinar que partículas corresponden a cada boya.

La estrategia que se ha seguido en este apartado con el objetivo de obtener los resultados que más se aproximen a la realidad, ha sido calibrar el modelado mediante el factor de arrastre de viento que vimos en el capítulo anterior y un factor de arrastre de las corrientes. De este modo se regula la intensidad con la que actúan de forma uniforme en el espacio y constante en el tiempo los forzamientos advectivos en este escenario. El rango del factor de arrastre de viento utilizado ce del 0% hasta el 6%. El 0% implica no considerar el efecto del viento, y el 6% supone considerar el efecto del viento juntamente con la interacción entre viento y oleaje. En cambio, el rango del factor de arrastre de las corrientes utilizado ha sido entre 0 y 1.

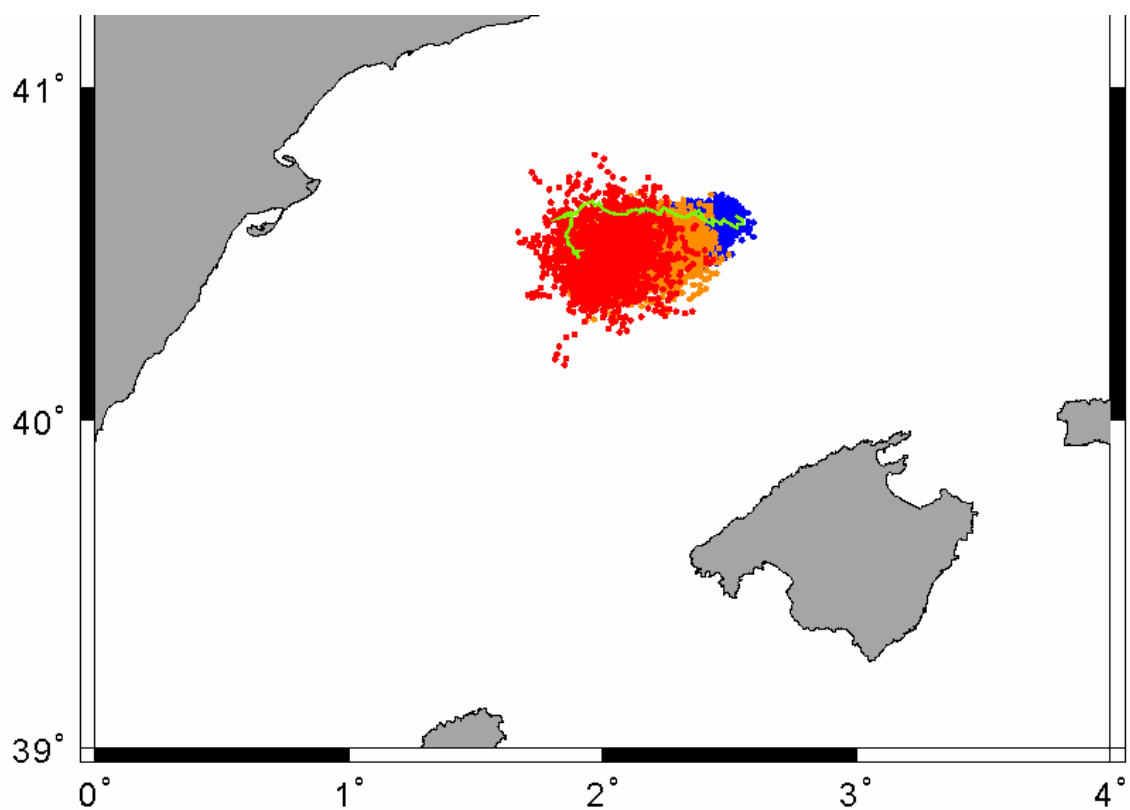
Cada vertido ha sido parametrizado en un conjunto finito de partículas siguiendo el mismo criterio: se han distribuido aleatoriamente 150 partículas en un círculo de radio 500m centrado en el emplazamiento que ocupa cada boya en el instante  $t=0$ . La razón

por la que se ha procedido de esta manera es debido a que se está contrastando la hidrodinámica del océano y toda la incertidumbre que en ella reside mediante el recorrido descrito únicamente por una partícula (la boya Lagrangiana), por lo tanto se debe trabajar con un margen de resultados que consiga contemplar todos los posibles fenómenos que puedan haber originado el movimiento de la misma.

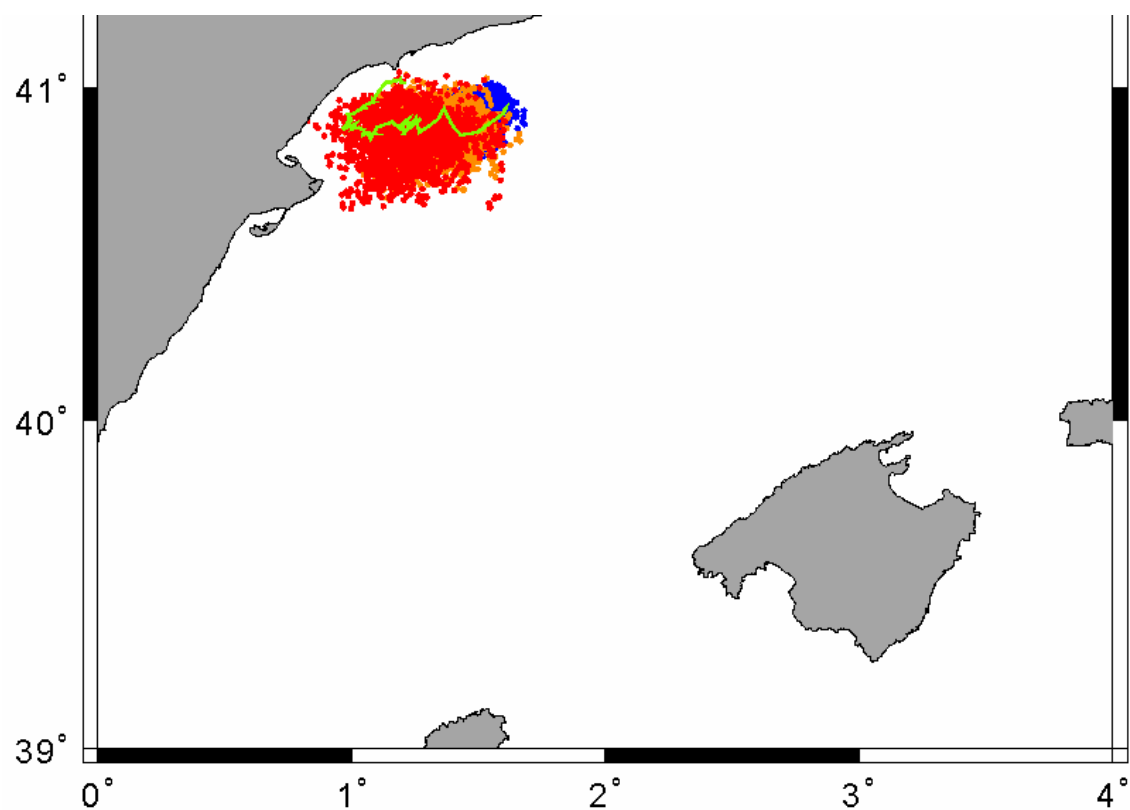
Una vez establecidas las condiciones iniciales, las condiciones de contorno y los parámetros con los que se va a efectuar la calibración de cada uno de los escenarios planteados, se han realizado una serie de simulaciones que han permitido obtener unas representaciones gráficas de la deriva de cada vertido virtual y se ha superpuesto a la trayectoria que describió en su momento la boya Lagrangiana correspondiente. Las partículas azules son las correspondientes a las primeras 24h de simulación, las partículas naranjas a las segundas 24h y las rojas a las terceras. La línea verde es la representación de la trayectoria de cada boya que tuvo lugar durante las fechas de la simulación. A continuación se adjuntan gráficos de los resultados más significativos, donde se pueden observar las combinaciones de los factores de arrastre de Vientos y Corrientes que proporcionan una aproximación más fidedigna para cada boya:



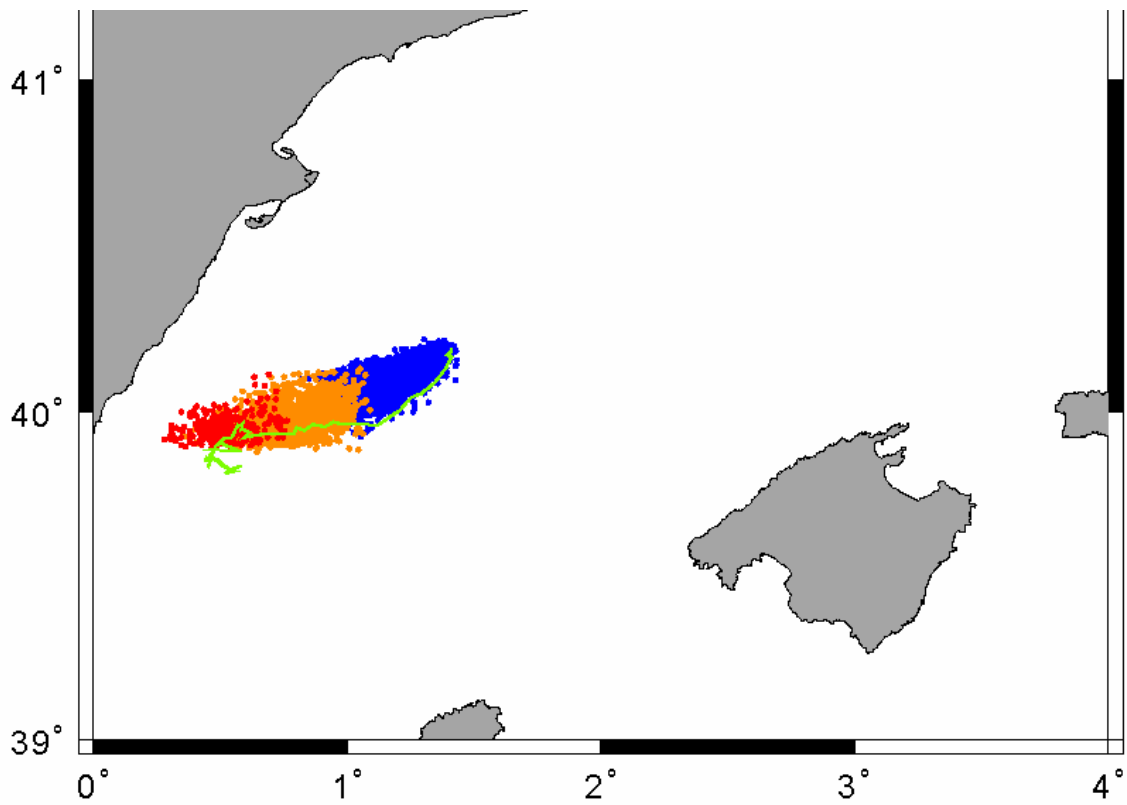
**Figura 4.3:** Simulación para la boya 95743, factor de arrastre de viento 6%, factor de arrastre de las corrientes 0.



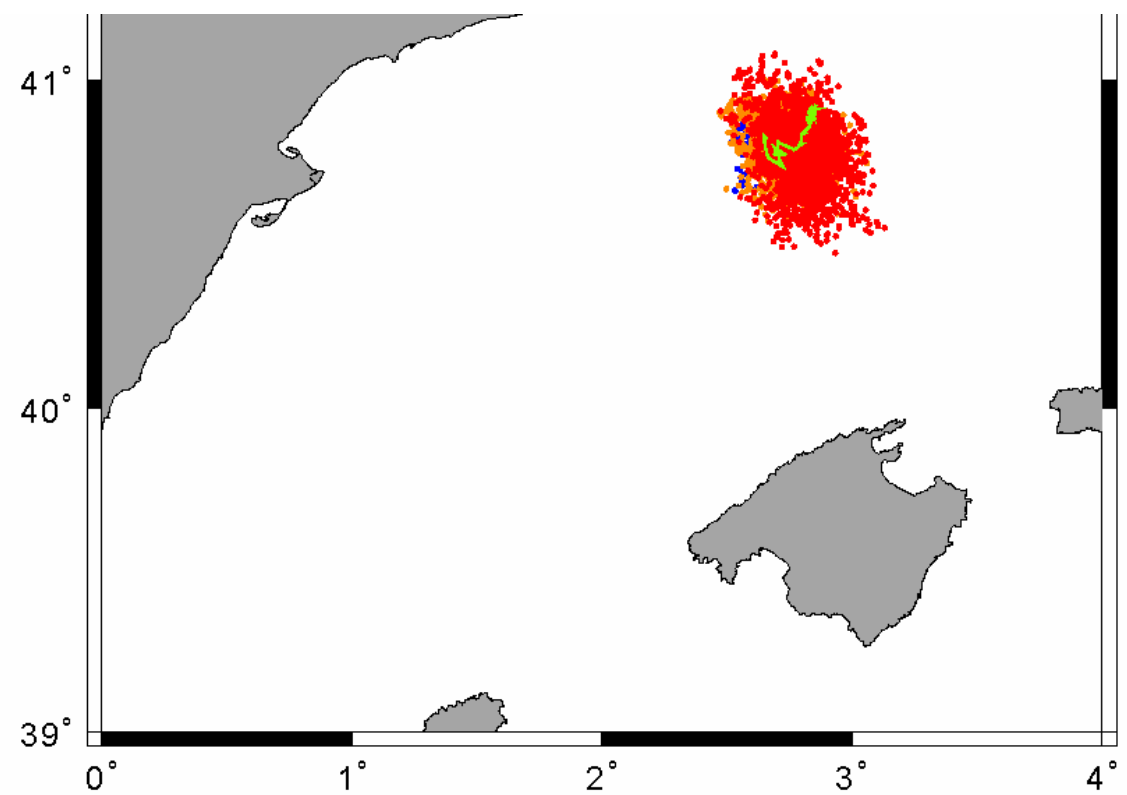
**Figura 4.4** Simulación para la boya 95744, factor de arrastre de viento 3%, factor de arrastre de las corrientes 0.



**Figura 4.5:** Simulación para la boya 95745, factor de arrastre de viento 3%, factor de arrastre de las corrientes 1.



**Figura 4.6:** Simulación para la boya 95746, factor de arrastre de viento 6%, factor de arrastre de las corrientes 0.



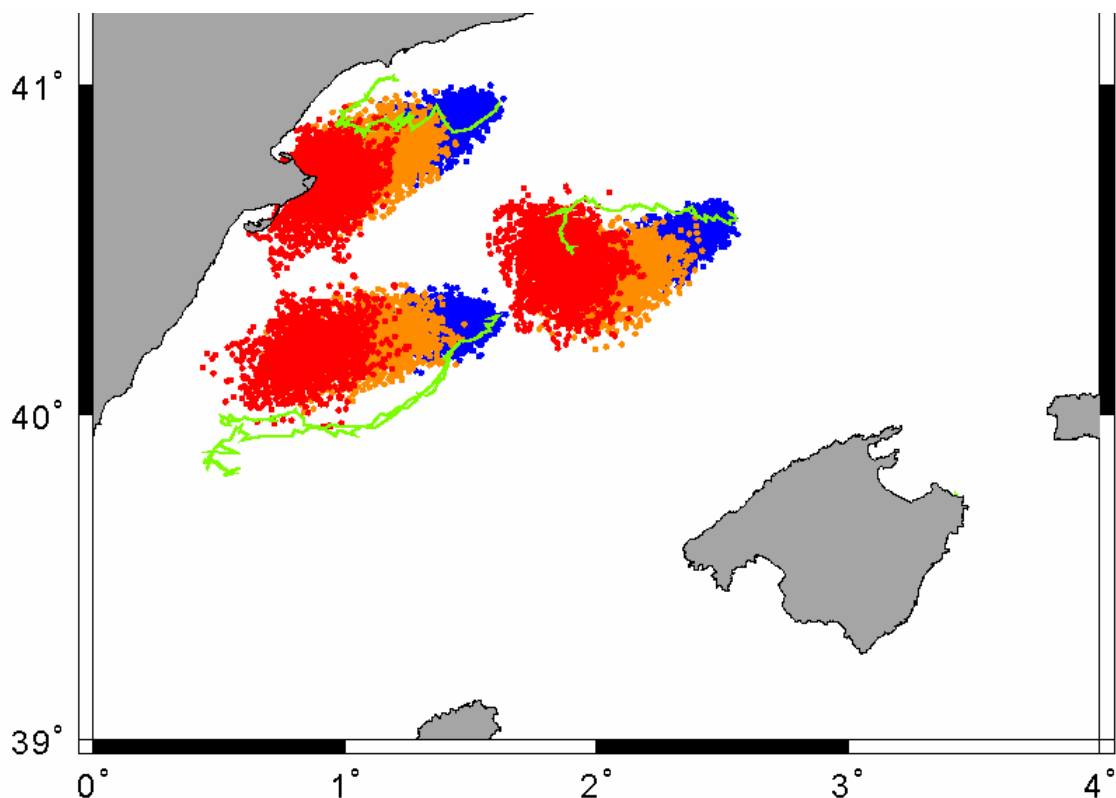
**Figura 4.7:** Simulación para la boya 95750, factor de arrastre de viento 0%, factor de arrastre de las corrientes 1.

El análisis de éstos resultados, contextualizados en un intervalo temporal y un escenario específicos, nos ha permitido obtener las siguientes conclusiones:

- El agente forzador que determinó esencialmente las trayectorias que describen las boyas 95743, 95744 y 95746 fue el viento.
- En el caso de la boya 95745 tanto vientos como corrientes gobernaron componente advectiva de la deriva de la boya
- Analizando los resultados obtenidos en todas las simulaciones realizadas (Ver Anejo 1) se ha comprobado que la boya 95750 no describe una trayectoria lógica que siga el mismo patrón que las boyas contiguas. Mientras la tendencia del resto de boyas es desplazarse hacia el Sur-Oeste la boya 95750 sigue una dirección Nord-Este, por lo tanto opuesta a lo que se podría esperar. La razón a la que se le ha adjudicado este extraño no se ha podido identificar, así que dadas las circunstancias se ha decidido omitir la boya 95750 durante el resto del análisis.
- Las boyas 95743, 95744 y 95746 son las boyas que están mas alejadas de la costa. Como se ha comentado con anterioridad el agente forzador más determinante fue el viento, en cambio la boya 95745, que se encuentra mucho mas próximo a la costa, se vio mas afectada por el efecto de las corrientes. De estos resultados se puede extraer que las corrientes influyen más en la deriva superficial en las zonas mas costeras.
- En la Figura 4.6, que corresponde a la simulación para la boya 95746 se intuye una línea horizontal (aproximadamente en la latitud 39,9°) a partir de la cual las partículas de la simulación desaparecen. Esta anomalía es debida a que el campo de predicciones de vientos proporcionado por AeMet con el que se ha trabajado en este escenario tiene el límite en esa longitud. Por lo tanto, una vez una partícula sale de el dominio, simplemente desaparece.

En las líneas precedentes se ha hecho un análisis el escenario para cada boya individualmente con el objetivo de encontrar patrones comunes, anomalías y extraer las conclusiones pertinentes. Gracias a este estudio se ha determinado prescindir de la boya 95750 y se ha corroborado que los resultados del modelado son coherentes. Sin embargo, para proseguir en dirección a los objetivos que se persiguen en el presente trabajo, se deben adjudicar unos valores al factor de arrastre de viento y al factor de arrastre de las corrientes que afecten a la totalidad del escenario de estudio. De este modo se han analizado todos los resultados obtenidos en las simulaciones que se adjuntan en el Anejo 1 para determinar los valores que se les debe asignar a sendos factores y con los que se trabajará de aquí en adelante. La combinación en la que se han observado los resultados que se aproximan de un modo mas preciso a los recorridos de las boyas Lagrangianas ha sido un factor de arrastre de viento del 5% y un factor de arrastre de corrientes de 1.

A continuación se puede observar en la Figura 4.8 como la elección de estos factores ofrece un resultado en el cual la trayectoria de las diferentes boyas se encuentra prácticamente en su totalidad, dentro del rango de posibles trayectorias que viene dado por la aproximación del modelado. También se observa como una vez las partículas embarrancan en la costa del Delta dejan de existir computacionalmente, es decir, no se contemplan en el siguiente paso de la iteración temporal.



**Figura 4.8:** Simulación para combinación de factores que mas se ajusta a la realidad, factor de arrastre de viento 5% factor de arrastre de las corrientes 1.

## 4.2 Implementación del retroanálisis en el modelo MELT2DO

El objetivo fundamental del presente trabajo es el de implementar el retroanálisis en el Modelo de transporte de hidrocarburos y posteriormente hacer un análisis del funcionamiento del mismo. La posibilidad de ejecutar el programa hacia atrás en el tiempo supone una herramienta básica para perseguir los vertidos operacionales que se mencionaron en el capítulo II de esta tesina.

Las operaciones de lastrado y deslastrado y el resto de acciones que dan lugar a un vertido operacional suponen una fuente de contaminación abundante y que en estos momentos es difícil de perseguir. Mediante la implantación del retroanálisis al modelo se pretende ofrecer la posibilidad de identificar presuntos culpables de vertidos operacionales. Sencillamente se trataría de, una vez avistado un derrame, averiguar su rango de trayectorias hacia atrás en el tiempo identificando posibles escenarios del vertido. Intersecando trayectorias de barcos susceptibles de sospecha con los posibles escenarios de vertido se obtendría un primer conjunto de posibles responsables. Inmediatamente después, acudiendo a un laboratorio que determine la composición química del producto vertido y comparándolo con el de los diferentes buques se debería poder reducir el número de sospechosos a uno y así adjudicarle la sanción correspondiente.

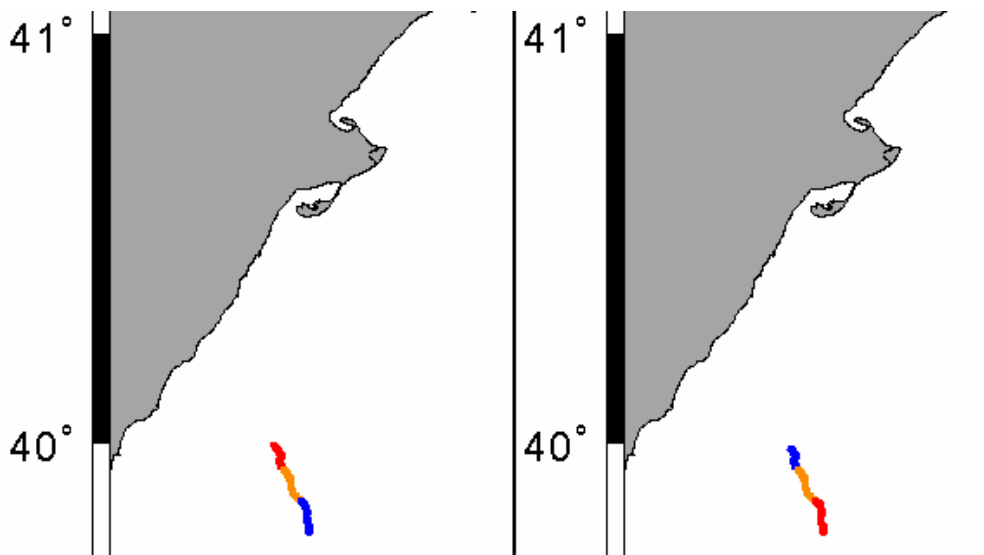
Para llevar a cabo la implementación del retroanálisis en el modulo de deriva del modelado numérico MELT2DO se han planteado dos frentes en los que, como en el caso del “*forward tracking*” se ha trabajado por separado: El transporte advectivo y el transporte difusivo.

#### 4.2.1 Transporte Advectivo horizontal

El procedimiento que se ha empleado para desplazar las partículas hacia atrás en el tiempo debido a los forzamientos advectivos ha sido sencillamente invertir el bucle de iteración temporal. Conceptualmente, se dispone de un conjunto discreto de valores de las velocidades de vientos y de corrientes en el tiempo y un conjunto discreto de partículas que representan un vertido, con lo cual, si se invierte el bucle de iteración temporal y en cada paso del mismo se aplican los vectores que representan las velocidades de los forzamientos en la misma dirección pero en sentido opuesto se obtendrán las mismas trayectorias, pero éstas se trazarán en sentido contrario.

A continuación (Figura 4.9) se adjuntan los resultados obtenidos mediante dos simulaciones, la primera se realizó aplicando el modelo en modo *forward tracking* a una partícula y forzando ésta únicamente mediante los forzamientos advectivos. Una vez efectuada la simulación se averiguaron las coordenadas lat-lon de la partícula en el último instante y se procedió a realizar la segunda simulación en modo retroanálisis desde ése punto, de éste modo se puede comprobar como efectivamente, las trayectorias que se observan son las mismas pero enfrentadas temporalmente.

Para la confección de éstas simulaciones se ha aplicado el mismo modelo, con la misma configuración de parámetros y con el escenario calibrado con los factores que se encontraron mas adecuados en el apartado anterior (factor de arrastre de viento 5.0 y factor de arrastre de corrientes 1.0).



**Figura 4.9:** trayectorias de la misma partícula en *forwardtracking* (izda) y en *retroanálisis* (dcha).



Se puede observar en la figura 4.9 como las trayectorias que describe la misma partícula son prácticamente idénticas. Del mismo modo que en el apartado anterior, las primeras 24h se representan mediante el color azul, las segundas con el naranja y las terceras con el color rojo, así se puede observar como las trayectorias se han trazado partiendo desde los extremos opuestos.

## 4.2.2 Transporte Difusivo horizontal

Abordar la implementación del retroanálisis en el modelo de transporte de hidrocarburos no es tan inmediato en lo que concierne al transporte difusivo. En el capítulo anterior se vio que en el modo *forwardtracking* el transporte difusivo se parametriza mediante los modelos estocásticos turbulentos, que suponen una aproximación a los procesos turbulentos y se presentaron los conceptos de varianza de las fluctuaciones de velocidades y de escala de correlación Lagrangiana.

Al tratarse de modelos que parametrizan los procesos reales que suceden en el océano, no es posible seguir el mismo procedimiento que en el transporte advectivo, puesto que no disponemos de un conjunto discreto de velocidades asociadas al transporte difusivo con las cuales mover las partículas en cada instante del tiempo.

Flesch y Wilson (1995) abordan esta problemática para el estudio de la emisión de gases nocivos y en él presentan las ecuaciones que gobiernan la evolución del movimiento y las fluctuaciones de velocidades de los procesos turbulentos en *retroanálisis*. Según plantean a lo largo de dicho artículo, los modelos presentados han demostrado ser muy adecuados para representar el *retroanálisis* de los gases en la atmósfera. Sin embargo, al igual que los modelos Markovianos descritos en el capítulo anterior de esta tesina, estas soluciones se tratan de adaptaciones concretas de la ecuación general de Langevin que se pueden adecuar a diferentes escenarios y diferentes medios dándole de nuevo los valores oportunos a la varianza de las fluctuaciones de velocidades y a la escala de correlación Lagrangiana.

En el modelo que proponen Flesch y Wilson (1995) para el transporte difusivo, como en el modelo *Random Flight* se asume que tanto la posición  $\mathbf{x}$  como la velocidad  $\mathbf{u}$  son variables Markovianas, por lo tanto supone que únicamente el orden de magnitud de las aceleraciones de las fluctuaciones son infinitesimales en comparación a las advectivas. En éste modelo, el transporte de las partículas vendrá dado por:

$$\begin{aligned} dx &= (U + u)dt \\ du &= (1/T)u dt + K^{1/2} dw \end{aligned} \quad (4.1)$$

La ecuación 4.1 que describe el transporte hacia atrás en el tiempo de las partículas es prácticamente igual que la ecuación 3.10 que ya se vio en el capítulo anterior cuando se expuso el modelo *Random Flight*. La única diferencia que existe es que en no hay signo negativo delante del término  $((1/T)u dt)$  por lo tanto lo que en la ecuación 3.10 suponía una pérdida de velocidad como efecto de la velocidad memorizada del instante previo ahora significa un aumento de la velocidad por el mismo motivo. De este modo la partícula también retiene información de su velocidad turbulenta inicial

durante un tiempo finito de orden la escala de correlación Lagrangiana  $T$ , característica del medio en el que se efectúa el estudio.

De la misma forma, las condiciones iniciales en  $t=0$  son un valor predeterminado y  $u(0) = \hat{u}$ . El valor de  $\hat{u}$  se extrae de una distribución Gaussiana con media cero y varianza  $\sigma_u^2$ ,  $dw^*$  es también un impulso aleatorio de una distribución normal.  $K^*$  es el coeficiente de difusión y se expresa en términos de la varianza de la velocidad:

$$K^* = \sigma_u^2 / T \quad (4.2)$$

### 4.2.3 Implementación numérica en el modelado

El proceso al cual se ve sometida cada una de las partículas en ésta aproximación describe una secuencia similar al que se empleó en la implementación numérica del *forward tracking*, pero modificando los términos advectivos y el signo negativo que acompaña al factor  $((1/T)udt)$  en el término difusivo. De este modo, las ecuaciones que gobiernan el desplazamiento de las partículas en *Retroanálisis* se rigen según las ecuaciones 4.3 y 4.4:

$$\begin{aligned} x_i^{n-1} &= x_i^n + \Delta x_i^n = x_i^n + (-u_i^n + u_i'^n) \Delta t \\ y_i^{n-1} &= y_i^n + \Delta y_i^n = y_i^n + (-v_i^n + v_i'^n) \Delta t \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} u_i'^{n-1} &= u_i'^n + (1/T)u_i'^n \Delta t + (2\sigma_u^2/T)^{1/2} w^n * \\ v_i'^{n-1} &= v_i'^n + (1/T)v_i'^n \Delta t + (2\sigma_v^2/T)^{1/2} w^n * \end{aligned} \quad (4.4)$$

$(x,y)_i^{n-1}$  se trata de la posición de la partícula  $i$  en el instante  $t=n-1$

$(x,y)_i^n$  se trata de la posición de la partícula  $i$  en el instante  $t=n$

$(u,v)_i^n$  es la componente advectiva de la velocidad en la posición  $i$  en el instante  $t=n$  en m/s

$(u',v')_i^n$  es la componente de la fluctuación turbulenta de la velocidad en la posición  $i$  en el instante  $t=n$  en m/s

$(u',v')_i^{n-1}$  es la componente de la fluctuación turbulenta de la velocidad en la posición  $i$  en el instante  $t=n-1$  en m/s

$(\sigma_u^2, \sigma_v^2)$  es el valor de la varianza de las fluctuaciones en cada dirección, que será un parámetro característico del escenario de estudio.

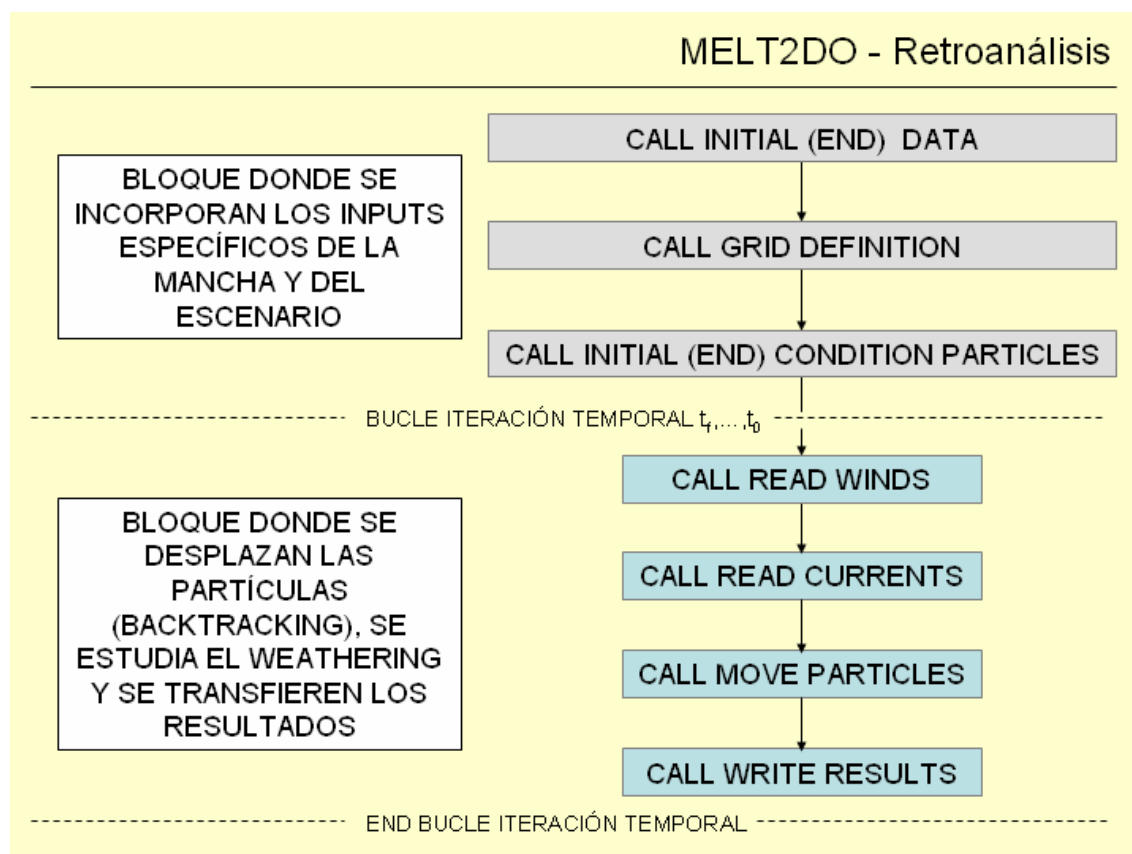
$T$  es el valor de la escala de correlación Lagrangiana en seg, cuyo valor dependerá de las características del medio donde se realice la simulación.

$w^n$  es un incremento aleatorio de una distribución normal con media cero y varianza  $2dt$

En el *retroanálisis*, durante un ciclo computacional, para cada partícula se solucionan las ecuaciones 4.3 para determinar la posición de la partícula en el instante  $n-1$ . Para el primer paso  $(x,y)_i^n$  tiene un valor prescrito y el valor del término turbulento  $(u',v')_i^n$  se seleccionada aleatoriamente de la distribución normal. Las ecuaciones 4.4 se

solucionan para determinar el valor de la componente de la velocidad turbulenta en el instante  $t = n-1$   $((u',v')_i^{n-1})$ . En el siguiente paso de tiempo, este valor se sustituye por  $(u',v')_i^n$  en la ecuación 4.3. Esta secuencia de cálculo se repite para predecir la posición de cada partícula en el tiempo.

Se presenta a continuación (Figura 4.10) el diagrama de flujo de la versión en modo *Retroanálisis* del modelado numérico de *oil spills* MELT2DO. Como se puede observar, las diferencias mas significativas son que las condiciones iniciales del vertido están mas determinadas y sobretodo que el bucle de iteración temporal está invertido.



**Figura 4.10:** Diagrama de flujo del programa MELT2DO - Retroanálisis

### 4.3 Determinación de las condiciones iniciales para realizar el Retroanálisis

A lo largo de este capítulo se ha trabajado con el objetivo de implementar un modo de *retroanálisis* en el modelado numérico de *oilspill* MELT2DO y adecuarlo al intervalo espacio-temporal en el que se enmarca el presente estudio. Primeramente se han calibrado en *forwardtracking* los factores que determinan la intensidad con la que el modelado debe aplicar los forzamientos advectivos para mover las partículas y continuación se ha realizado la adaptación del modelado numérico para proceder a la implementación numérica del *retroanálisis* en el mismo.

Ahora, en este apartado nos disponemos a hacer un análisis del funcionamiento del modelado numérico hacia atrás en el tiempo haciendo una serie de simulaciones con

las cuales se pretende realizar una calibración del mismo contrastando de nuevo los resultados obtenidos con las trayectorias de las boyas, pero en esta ocasión en modo retroanálisis. Las predicciones en este modo de predicción están concebidas para -24h o a lo sumo para -48h, esto es debido básicamente a dos razones:

- La primera es que éste tipo de predicciones están concebidas para averiguar de donde provienen los vertidos de tipo operacional' los cuales se caracterizan por no ser demasiado voluminosos. Por lo tanto, se tratan de manchas de hidrocarburo que en la mayoría de casos no superan los 200 metros de diámetro en el instante del vertido. De este modo, a los ejercicios de retroanálisis se les exige una precisión muy elevada y, por consiguiente, no se pueden abarcar aproximaciones minimamente precisas más allá de las 48h dada la incertidumbre que reside en el proceso que sigue el modelo para aproximar el desplazamiento de las partículas.
- El segundo motivo es que a la incertidumbre intrínseca de la dinámica del océano se le debe sumar el hecho de que las ecuaciones que sugieren Flesch y Wilson (1995) para parametrizar los procesos que gobiernan la evolución del movimiento y las fluctuaciones de velocidades de los procesos turbulentos en modo retroanálisis se abordan desde el punto de vista de la emisión de gases nocivos y se ha comprobado su eficacia en ése ámbito. Por lo tanto, pretender conseguir buenos resultados más allá de 48 horas hacia atrás en el tiempo se presume un ejercicio irrealizable con el estado del arte actual. Por otro lado, en cuanto a la componente advectiva del transporte superficial de los hidrocarburos, hay que decir que los campos de vientos y de corrientes con los que se trabaja en modo retroanálisis están confeccionados con datos empíricos, ya que los fenómenos que representan ya han tenido lugar en el pasado reciente, por lo tanto, en ese sentido se dispone de unos datos de forzamientos que reflejan sus valores reales.

Una vez delimitado el intervalo para el cual se pueden hacer las simulaciones, el siguiente paso que se debe abordar consiste en determinar las condiciones iniciales más apropiadas que garanticen obtener los resultados que se aproximen con mayor precisión en la medida de lo posible a los recorridos de las boyas.

Las condiciones iniciales en nuestro estudio consistirán en definir el radio inicial de las partículas con el que posteriormente se deberá ejecutar el modelado en modo retroanálisis. Como ya se ha expuesto anteriormente una mancha de petróleo en el mar se expande a medida que avanza el tiempo, por lo tanto la superficie de la mancha con la que se realizarán las simulaciones será mayor que la superficie que ocupaba la misma en el momento del vertido, por lo tanto, escoger un radio inicial adecuado será imprescindible para obtener resultados que se aproximen lo máximo posible a la deriva real de los hidrocarburos. Este radio se verá condicionado por cuatro particularidades:

1. La precisión que se pretende conseguir. Es decir el diámetro que se supone que tenía el vertido originalmente condicionará el tamaño del vertido virtual que deberá introducirse como dato para llevar a cabo la simulación. Este matiz se denomina precisión en este caso particular ya que, para contrastar los resultados obtenidos mediante las simulaciones, únicamente se cuenta con los datos empíricos de las

trayectorias descritas por un conjunto de 4 boyas y por lo tanto el diámetro que realmente ocupa en el instante inicial el supuesto vertido con el que se pretende corroborar la validez de los resultados debería tomar un valor de 0. De este modo, el radio que supongamos que tenía el vertido inicialmente supondrá el valor de una especie de “ $\epsilon$ ” que otorgará a los resultados una holgura determinada en función del valor que se le adjudique. Por lo tanto, al fijar una precisión estaremos determinando el radio inicial del supuesto vertido ( $\epsilon$ ) y éste condicionará el radio con el que se deberá realizar la predicción en modo retroanálisis.

2. La duración de las simulaciones hacia atrás en el tiempo: Como se ha podido observar en los apartados anteriores donde se han analizado las representaciones en modo *forwardtracking*, la superficie que abarcan un numero determinado de partículas en el instante inicial va aumentando progresivamente en a medida que el tiempo avanza, es decir, la trayectoria que dibujan el conjunto de las partículas en modo *forwardtracking* describe una forma conoidal. El agente responsable de este fenómeno es el término difusivo del transporte que, como se vio en el capítulo III en las ecuaciones 3.9 y 3.12 (Spaulding et al. 2005), el desplazamiento promedio (con respecto a su origen) generado por las fluctuaciones de velocidad asociadas a la componente difusiva del transporte aumenta con el tiempo, y lo hace siguiendo un patrón u otro en función del modelo estocástico turbulento que se emplee. Por lo tanto, para una precisión determinada, si la predicción es de -24h, el radio inicial del vertido virtual será menor que si la predicción es de -48h.
3. El número de partículas con el que se va a discretizar el vertido: para dos simulaciones en condiciones idénticas en modo *forwardtracking*, si discretizamos el vertido mediante un número desigual de partículas, la superficie que abarcan en cada paso del tiempo aumentará en mayor o menor medida durante el transcurso de la simulación. Como ya se ha mencionado con anterioridad, los procesos que gobiernan el transporte superficial de los hidrocarburos aportan incertidumbre al desarrollo de este estudio. Con la intención de solventarla, se riegan un conjunto discreto de partículas independientes las unas de las otras y cada una de ellas describirá una trayectoria determinada que no se verá alterada por la interacción entre ellas, es decir que para un numero diferente de partículas éstas seguirán trayectorias diferentes y por lo tanto, aumentará la probabilidad de que el diámetro de la circunferencia que circunscribe a todas las partículas en cada paso del tiempo sea diferente.
4. La varianza de las fluctuaciones de velocidad o Factor turbulento y la escala de correlación Lagrangiana: ambos factores son característico del medio y van a condicionar la velocidad a la cual aumente la superficie que abarca el conjunto de las partículas en cada paso del tiempo, ya que , como se vio en el capítulo III en las ecuaciones 3.9 y 3.12 (Spaulding et al. 2005), el desplazamiento promedio (con respecto a su origen) generado por las fluctuaciones de velocidad asociadas a la componente difusiva del transporte varía en función del valor de los término  $\sigma^2$  y T.

La estrategia que se ha seguido en este apartado con el objetivo de determinar el radio inicial que proporcione los resultados que mas se aproximen a la realidad, ha sido efectuar un análisis que nos permita esclarecer en que medida afectan los

parámetros influyentes sobre el tamaño del radio inicial que debemos imponer. Este proceso requerirá de una serie de simulaciones en modo *forwardtracking* que se realizarán sistemáticamente, otorgando distintos valores a los parámetros mencionados con anterioridad, que proporcionarán resultados con distintas configuraciones de los mismos. Una vez realizadas tales simulaciones, se desarrollarán los estudios pertinentes sobre las relaciones entre estos parámetros y el radio inicial. Asimismo, para que el estudio tenga un carácter homogéneo y sea representativo en todo el dominio en el que se enmarca el estudio, se han hecho diversas representaciones en distintas posiciones de cada boya en el espacio y en diferentes instantes del intervalo temporal del cual se tienen datos empíricos.

En el apartado 4.1 se indicó que únicamente se disponían de registros de cuatro boyas y de cuatro días (96 horas) concretos, del 27 de Septiembre del 2009 al 1 de Octubre del 2009. Dentro de este contexto temporal se han fijado las siguientes fechas de inicio de las simulaciones:

27/09/09 a las 12:00	Para simulaciones de 24h de duración	27/09/09 a las 12:00	Para simulaciones de 48h de duración
28/09/09 a las 12:00		28/09/09 a las 12:00	
29/09/09 a las 12:00		29/09/09 a las 12:00	
30/09/09 a las 12:00			

En cada una de estas fechas se han situado 4 vertidos virtuales en la posición que le corresponde a cada boya en ese preciso instante. Para proceder a simular el transporte superficial de cada uno de esos vertidos se han seguido realizado todas las combinaciones posibles adjudicándole a cada parámetro uno de los siguientes valores:

#### *Duración*

Se han efectuado simulaciones de duración 24h y 48h para todos los puntos

#### *Número de partículas*

En todos los ejercicios de predicción se han dispuesto 150 partículas en cada punto de vertido, por lo tanto los resultados obtenidos vendrán asociados a éste número de partículas, con lo cual de cara a hacer uso de ellos para proceder con el análisis en modo retroanálisis se deberá tener en cuenta que el número de partículas tendrá un valor fijo de 150.

#### *Radio inicial*

El valor del radio inicial de las representaciones podrá tomar tres valores diferentes, serán: 1000m, 250m y 150m en función de la holgura que se estime oportuna.

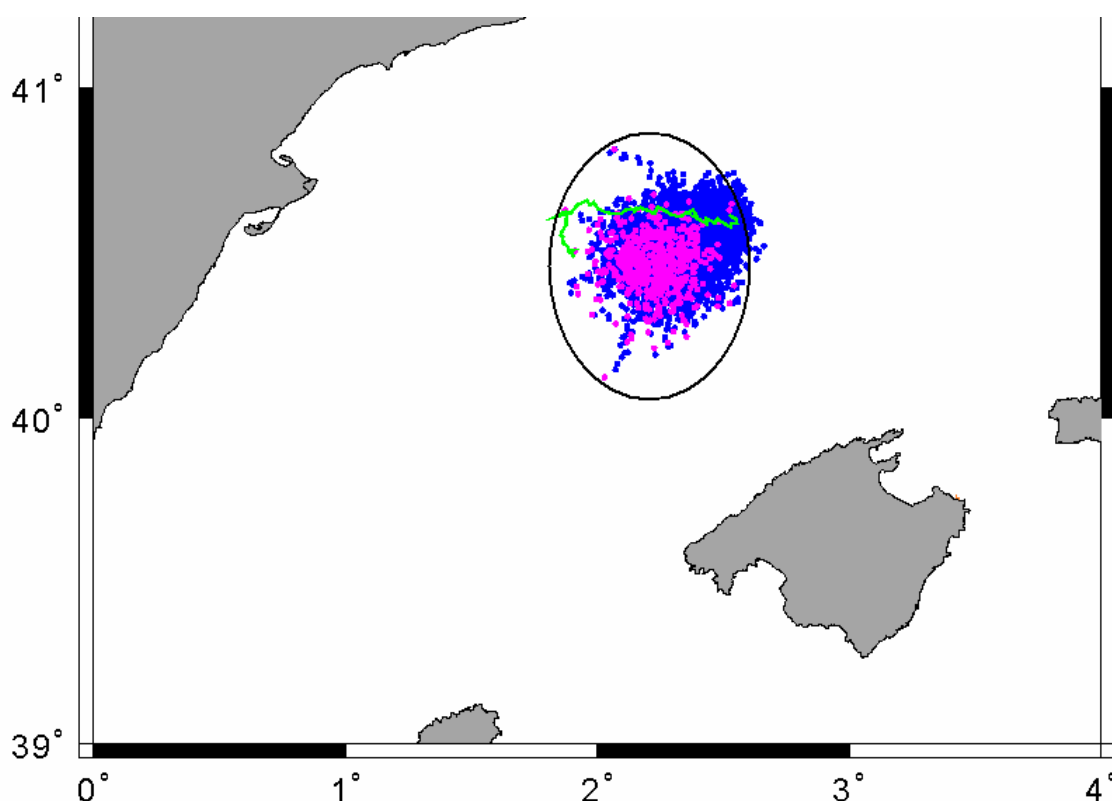
### *Transporte advectivo*

Los campos de forzamientos advectivos que se van a emplear en el presente análisis son los mismos que los utilizados en el apartado 4.1, y al factor de arrastre de viento y el factor de arrastre de corrientes se les asignara el valor de 5% y 1.0 respectivamente como se determinó en el apartado 4.1

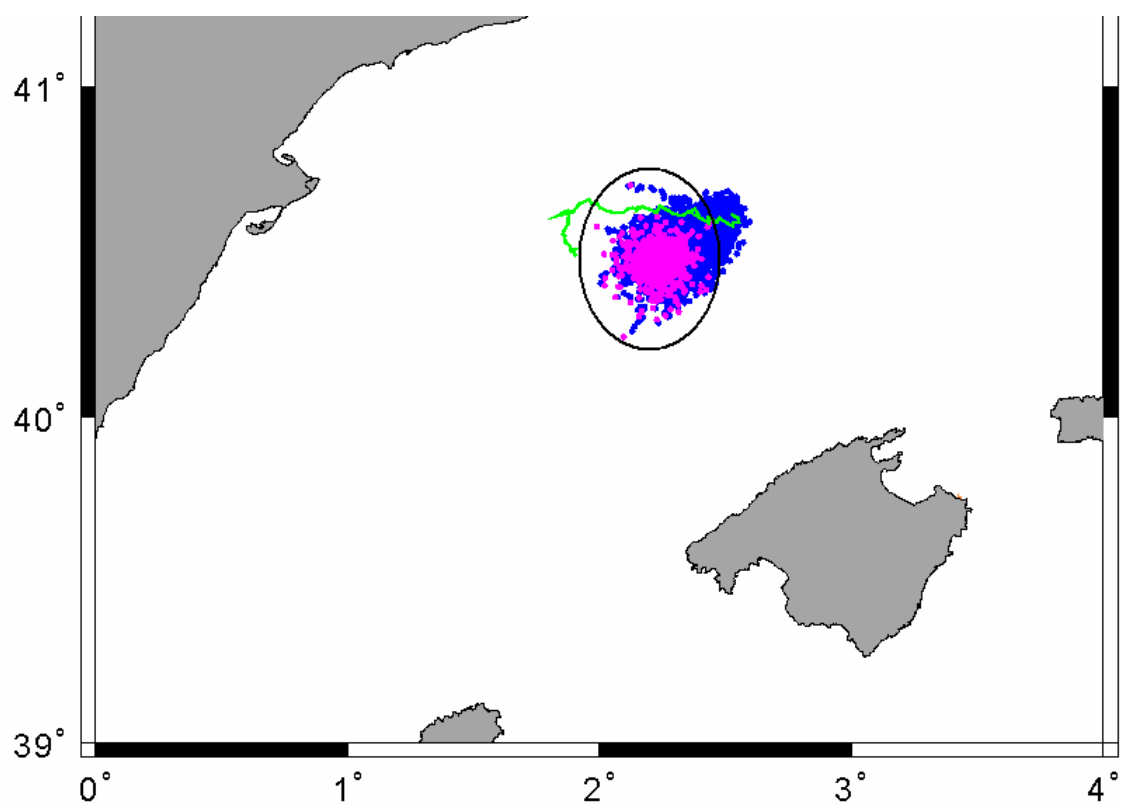
### *Transporte difusivo*

El modelo estocástico Lagrangiano utilizado en las simulaciones es el Modelo Markoviano Random Flight, la escala de correlación Lagrangiana en éste escenario es de 3600 segundos. Como se puede observar el paso de tiempo es menor que el valor de la escala de correlación Lagrangiana y por lo tanto emplear el Random Flight es justificado. La desviación estándar en cambio tomará valores diferentes: 0.05, 0.1 y 0.15

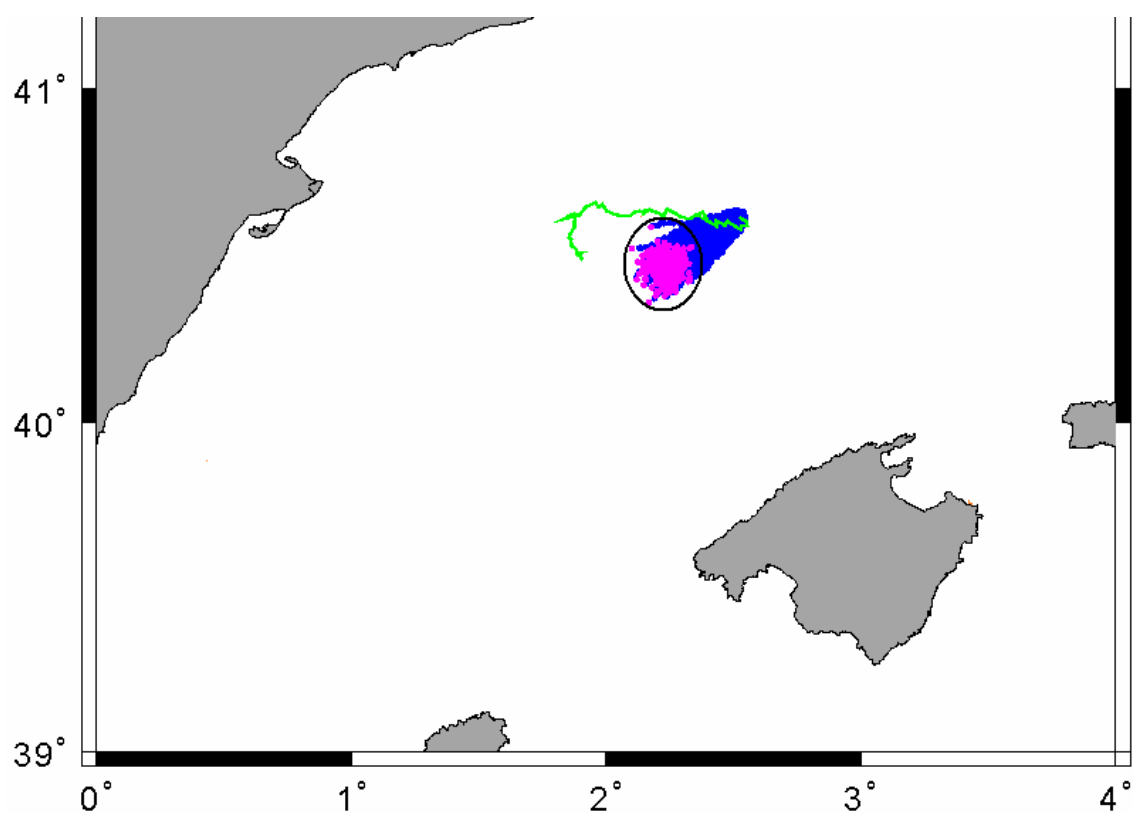
Para proceder a la confección de simulaciones se han permutando todos los posibles valores de las variables generando toda la casuística pertinente. En total se han obtenido 336 resultados. A continuación, en las figuras 4.11-4.16, se presentan a modo de ejemplo representativo todos los resultados obtenidos para la boya 95745 en la fecha del 27 de Septiembre con radio inicial 1000m:



**Figura 4.11:** Simulación con radio inicial 1000m.  $\sigma^2=0.15$ , duración 24h.  
Radio final estimado: 72.22Km

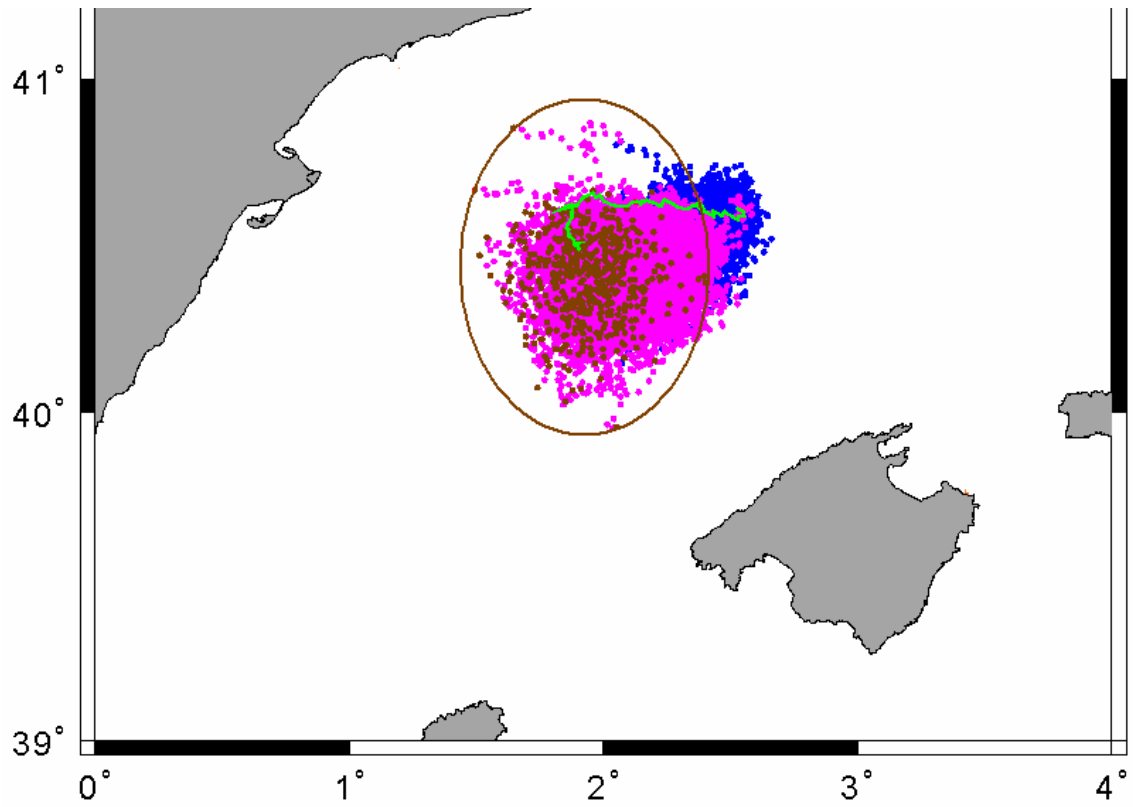


**Figura 4.12:** Simulación con radio inicial 1000m.  $\sigma^2=0.1$ , duración 24h.  
Radio final estimado: 47.78Km

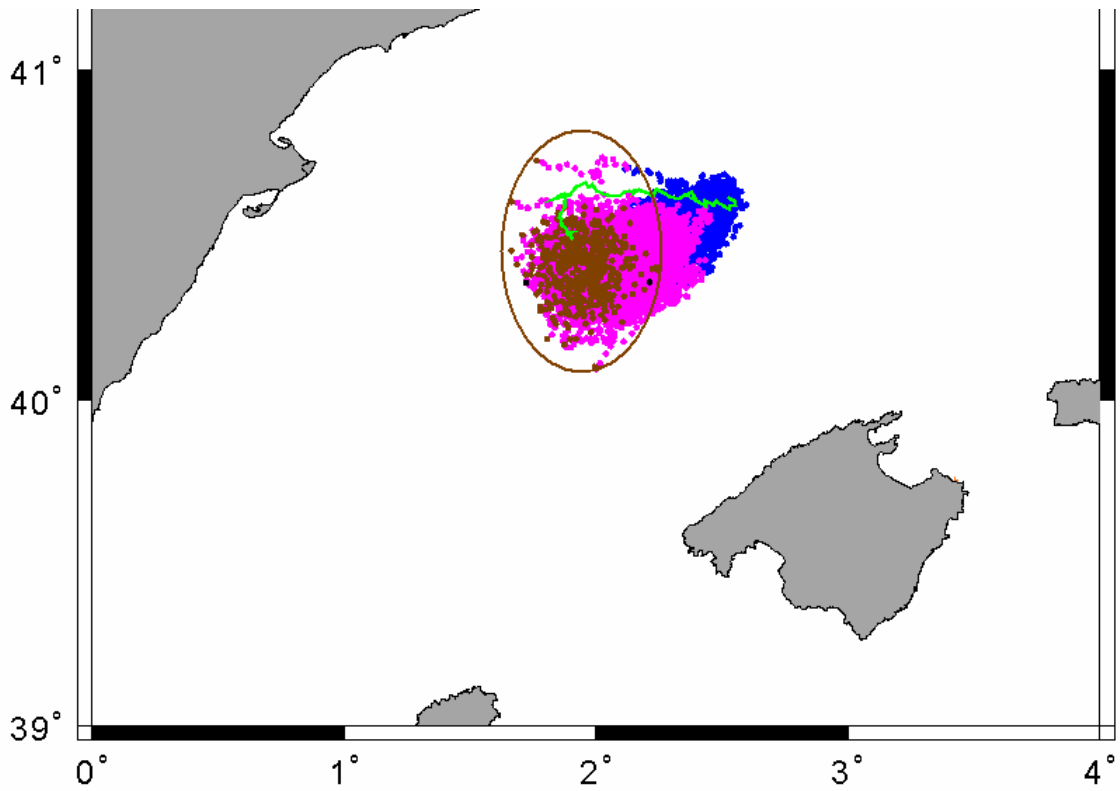


**Figura 4.13:** Simulación con radio inicial 1000m.  $\sigma^2=0.05$ , duración 24h.  
Radio final estimado: 25.56Km

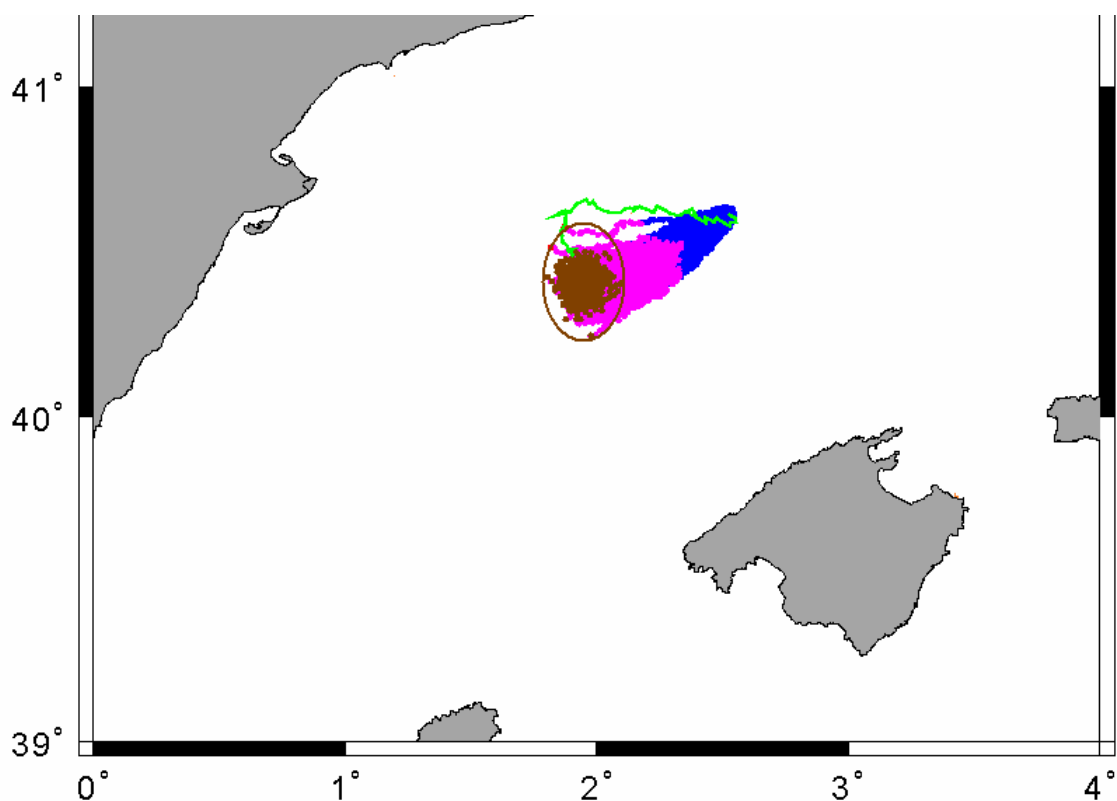




**Figura 4.14:** Simulación con radio inicial 1000m.  $\sigma^2=0.15$ , duración 48h.  
Radio final estimado: 91.11Km



**Figura 4.15:** Simulación con radio inicial 1000m.  $\sigma^2=0.1$ , duración 48h.  
Radio final estimado: 58.89Km



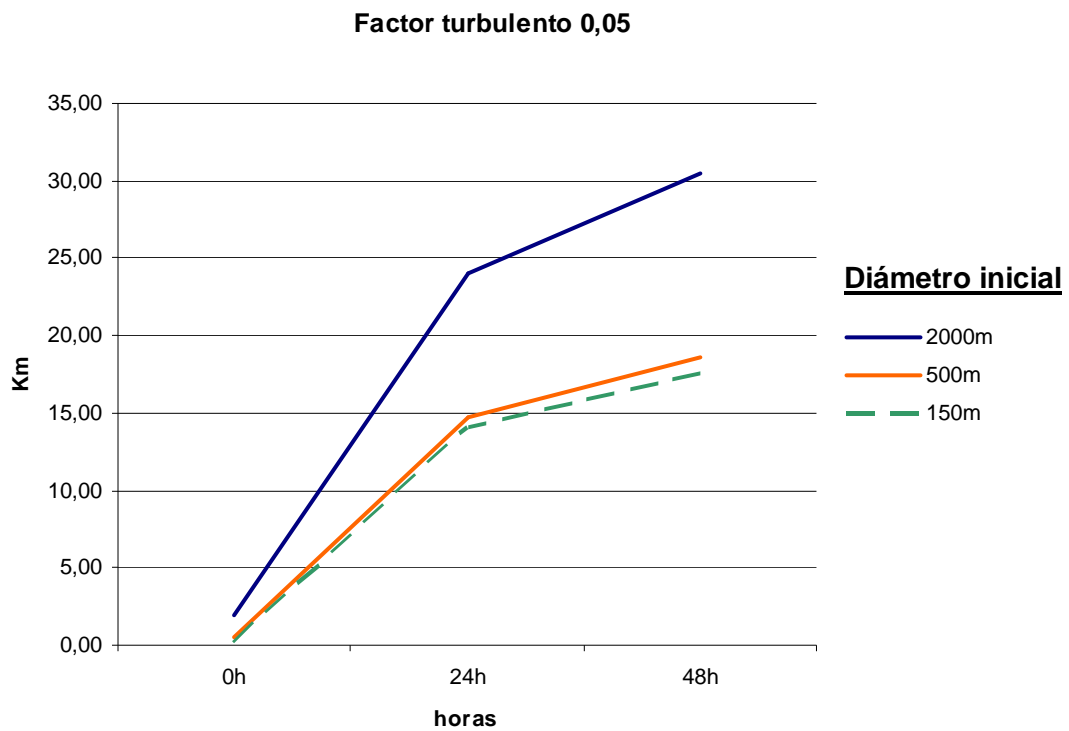
**Figura 4.16:** Simulación con radio inicial 1000m.  $\sigma^2=0.05$ , duración 48h.  
Radio final estimado: 27.78Km

Haciendo acopio de todos los resultados de las respectivas simulaciones y calculando los respectivos radios finales, se han obtenido las superficies que abarcan las elipses que ocupan el conjunto de partículas en el instante final de la simulación en función de la duración de la misma, del Factor turbulento y del radio inicial. En el Anejo 2 se adjuntan las tablas del conjunto de resultados obtenido con todos los detalles.

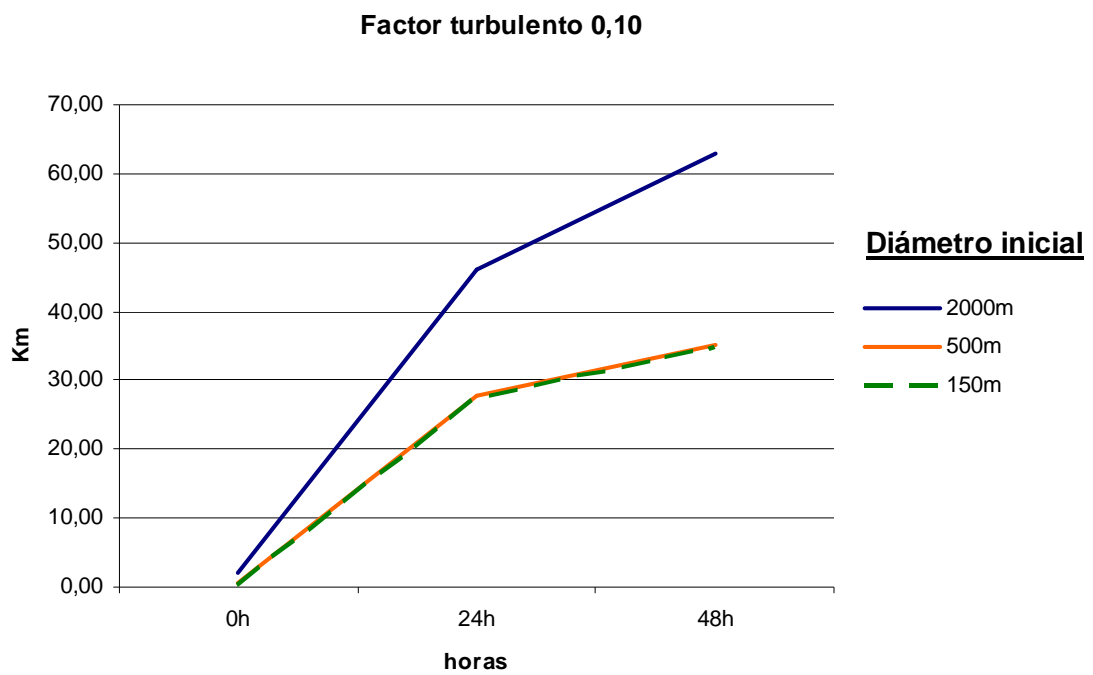
A continuación se presentan los resultados más significativos ordenados en función del factor turbulento correspondiente (Tabla 4.1) así como las gráficas que muestran la evolución del diámetro de la mancha en función del tiempo asociada a un valor del factor turbulento concreto (Figuras 4.17-4.19).

Factor turbulento ( $\sigma^2$ )	Tiempo		
	0h	24h	48h
<b>0,05</b>	2,00 Km	23,97 Km	30,51 Km
	0,50 Km	14,72 Km	18,54 Km
	0,15 Km	14,13 Km	17,58 Km
<b>0,10</b>	2,00 Km	46,11 Km	62,96 Km
	0,50 Km	27,88 Km	35,05 Km
	0,15 Km	27,46 Km	34,90 Km
<b>0,15</b>	2,00 Km	63,33 Km	94,32 Km
	0,50 Km	40,87 Km	52,28 Km
	0,15 Km	39,96 Km	52,19 Km

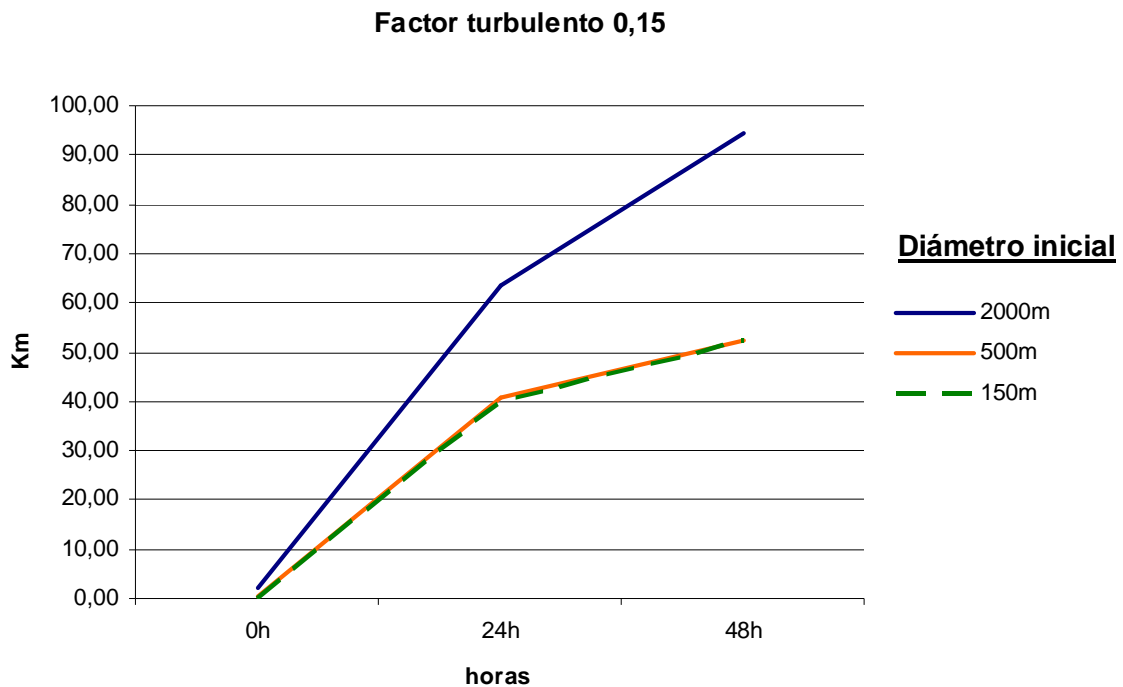
**Tabla 4.1:** Diámetros medios asociados a un factor turbulento, a un radio inicial y a una duración de la simulación.



**Figura 4.17:** Evolución del diámetro de la mancha en función del tiempo, Factor turbulento 0,05



**Figura 4.18:** Evolución del diámetro de la mancha en función del tiempo, Factor turbulento 0,10



**Figura 4.19:** Evolución del diámetro de la mancha en función del tiempo, Factor turbulento 0,15

Analizando los resultados obtenidos, se puede observar como el diámetro de la mancha crece mas rápidamente cuanto mayor sea el Factor turbulento, hecho que corrobora, como se vio en el capítulo III en las ecuaciones 3.9 y 3.12 (Spaulding et al. 2005), que el desplazamiento promedio (con respecto a su origen) generado por las fluctuaciones de velocidad asociadas a la componente difusiva del transporte aumenta con el tiempo. También se debe remarcar el hecho de que la diferencia entre el crecimiento de las manchas de hidrocarburos para un diámetro inicial de 2000m es mucho mayor que para las demás. En cambio las gráficas de la evolución temporal del diámetro muestran que escoger un radio de 250m o de 150m no da lugar a diferencias considerables.

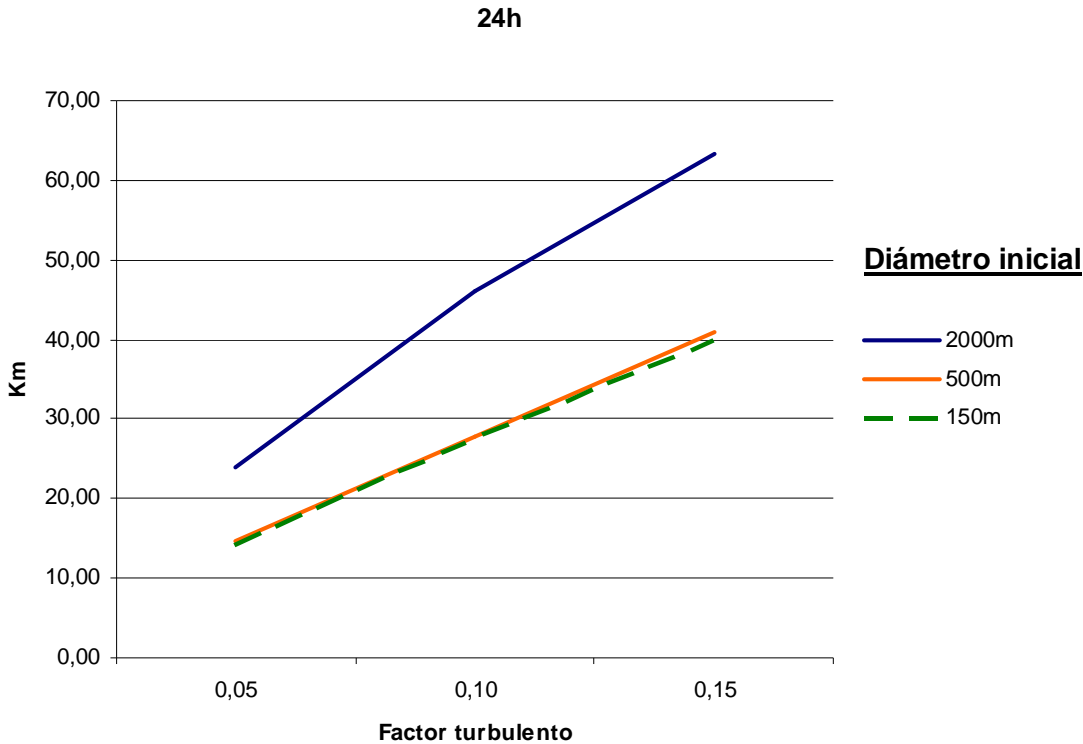
Quizás lo mas importante a resaltar viendo estas gráficas es que para cualquier radio inicial, la gráfica tiene un comportamiento mucho más balístico para las primeras 24h que para las segundas, es decir que la pendiente de crecimiento de la superficie de la mancha es mayor en las primeras 24h que en las consecutivas. Esto es debido a las características de la dispersión absoluta, que son las tasas a las cuales se separan las partículas con respecto a su origen (Madrigal, comunicación personal). Este fenómeno se presenta en los medios geofísicos cuando existen un conjunto de partículas con una distancia media entre ellas relativamente pequeña comparada con la longitudes de onda característica de los fenómenos que suceden en el océano, entonces inicialmente el medio separará esas partículas proporcionalmente al tiempo al cuadrado hasta que después de un tiempo, cuando las partículas están separadas entre ellas una distancia media similar a las longitudes de los fenómenos que se den en ese medio. A partir de ese instante las partículas se separarán proporcionalmente al tiempo a la primera potencia. Esta circunstancia también es la causante de que las gráficas de la evolución temporal del diámetro para el radio inicial de 1000m metros difiera tanto de las otras dos, ya que todas las simulaciones se han elaborado con el

mismo número de partículas, y por lo tanto inicialmente la distancia media entre las partículas en el caso de radio 1000m es significativamente mayor que en las otras dos.

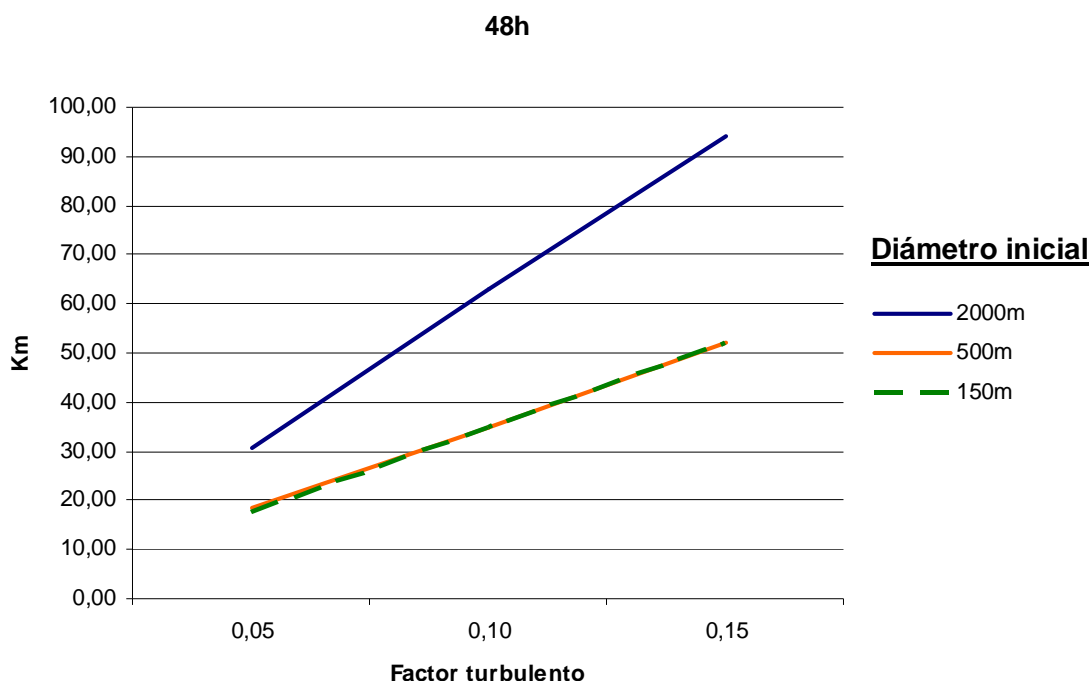
A continuación se exponen los mismos resultados, pero en esta ocasión ordenados desde otra perspectiva, en la cual se pretende enfatizar el ritmo al que crece el diámetro en función del factor turbulento tanto para 24h como para 48h después del vertido virtual (Tabla 4.2). Asimismo, en las figuras 4.20 y 4.21 se puede contemplar la influencia del factor turbulento en el radio de la mancha para los instantes +24h y +48 después del vertido respectivamente.

Tiempo	Diametro Inicial (m)	Factor turbulento ( $\sigma^2$ )		
		0,05	0,10	0,15
24h	2000	23,97 Km	46,11 Km	63,33 Km
	500	14,72 Km	27,88 Km	40,87 Km
	150	14,13 Km	27,46 Km	39,96 Km
48h	2000	30,51 Km	62,96 Km	94,32 Km
	500	18,54 Km	35,05 Km	52,28 Km
	150	17,58 Km	34,90 Km	52,19 Km

**Tabla 4.2:** Diámetros medios asociados a un factor turbulento, a un radio inicial y a una duración de la simulación.



**Figura 4.20:** Evolución del diámetro de la mancha en función del factor turbulento. Duración 24h



**Figura 4.21:** Evolución del diámetro de la mancha en función del factor turbulento. Duración 48h

Analizando estas gráficas se puede poner de manifiesto que, en los resultados obtenidos para 48h, la relación entre el diámetro y el factor turbulento es lineal, y en cambio, en los resultados de las simulaciones de 24h no lo es. Esto es debido las características de la dispersión absoluta, que como se comentó en el análisis de las figuras 4.17-4.19, es responsable de que la dispersión de las partículas en los primeros instantes de simulación se produzca más rápidamente y por lo tanto la relación entre el diámetro de la mancha y el factor turbulento no sea perfectamente lineal.

Una vez realizado el análisis de los resultados se debe seleccionar uno de los tres radios para establecer la precisión con la que se va a llevar a cabo el estudio en retroanálisis. El radio de 1000 metros se ha desestimado ya que, como ya se ha especificado anteriormente, los vertidos del tipo operacional contemplan manchas de radios mucho menores, por lo tanto elaborar un estudio del funcionamiento del retroanálisis utilizando los valores de los radios asociados a esta holgura seria poco preciso.

Finalmente entre los otros dos casos de 150m y 500m de holgura, se ha decidido optar por la primera opción, ya que, analizando los resultados mediante las graficas de las figuras 4.17-4.19 se observa que la evolución en ambos casos prácticamente se superpone y por consiguiente escogiendo un radio inicial parecido se puede obtener una precisión mayor. Por ejemplo si acudimos a la tabla 4.2, podemos observar como para hacer una simulación en retroanálisis con un factor turbulento de 0.1 a -24 horas y con un diámetro inicial de 27,88 metros obtendremos una holgura “ $\epsilon$ ” de 250 metros y en cambio disminuyendo el radio inicial ligeramente hasta 27,46 metros la holgura “ $\epsilon$ ” será de tan solo 75 metros y por lo tanto sensiblemente mas preciso. Se puede contemplar en la tabla 4.2 como este análisis es extrapolable a cualquier caso y en consecuencia se ha optado por la opción de 150m.

## 4.4 Análisis del modelado numérico en modo retroanálisis.

Durante el presente capítulo se ha hecho hincapié en todas las consideraciones previas que se tienen que tener en cuenta para poder hacer el ejercicio de predicción en modo retroanálisis de los vertidos de hidrocarburos en el mar. En estos momentos ya se han fijado los factores que determinan la intensidad con la que el modelado debe aplicar los forzamientos advectivos para mover las partículas, se ha adaptado el modelo de *oil spill* MELT2D0 obteniendo la configuración adecuada para implementar el modo retroanálisis y se ha efectuado un estudio exhaustivo sobre las condiciones iniciales idóneas enmarcadas en el escenario de este estudio. Llegados a este punto, el objetivo en este apartado es realizar una serie de simulaciones en modo retroanálisis que representen vertidos virtuales en los lugares donde se encuentran las diferentes boyas en unas fechas determinadas y contrastarlos mediante un estudio probabilístico con las trayectorias de la deriva real.

A continuación se muestran las condiciones con las que se han llevado a cabo las simulaciones, y se presentan los valores que se han asignado a las variables con las que se han realizado las simulaciones:

- En este caso, al tratarse de un retroanálisis, las simulaciones transcurrirán entre el 01 de Octubre del 2009 al 27 de Septiembre del 2009 con intervalos temporales de -24 y -48h A continuación se muestran las fechas de inicio de las simulaciones:

01/10/09 a las 12:00	Para simulaciones de 24h de duración	01/10/09 a las 12:00	Para simulaciones de 48h de duración
30/09/09 a las 12:00		30/09/09 a las 12:00	
29/09/09 a las 12:00		29/09/09 a las 12:00	
28/09/09 a las 12:00			

- En cada una de estas fechas se han situado 4 vertidos virtuales con 150 partículas en cada uno en la posición que le corresponde a cada boya en ese preciso instante.
- Del mismo modo que en las simulaciones elaboradas en el primer apartado de este capítulo, el transporte se efectuará únicamente de manera superficial, por lo tanto el conjunto de partículas que representan el volumen total de cada vertido permanecerá constante a lo largo de cada simulación a no ser que entren en contacto con la costa o salgan del dominio de los campos de forzamientos advectivos.
- Los campos de los forzamientos advectivos con los que se van a realizar las simulaciones en retroanálisis son los mismos con los que se trabajo en modo *forwardtracking*. Los valores del factores de arrastre de viento y de arrastre de corrientes tendrán asignado los valores determinados como mas adecuados en el apartado 4.1, éstos son 5% y 1.0 respectivamente
- La escala de correlación Lagrangiana en éste escenario se considerará de nuevo 3600 segundos.
- En cuanto al factor turbulento o desviación estándar de las fluctuaciones de velocidades se va a proceder a realizar un estudio sobre su importancia en el

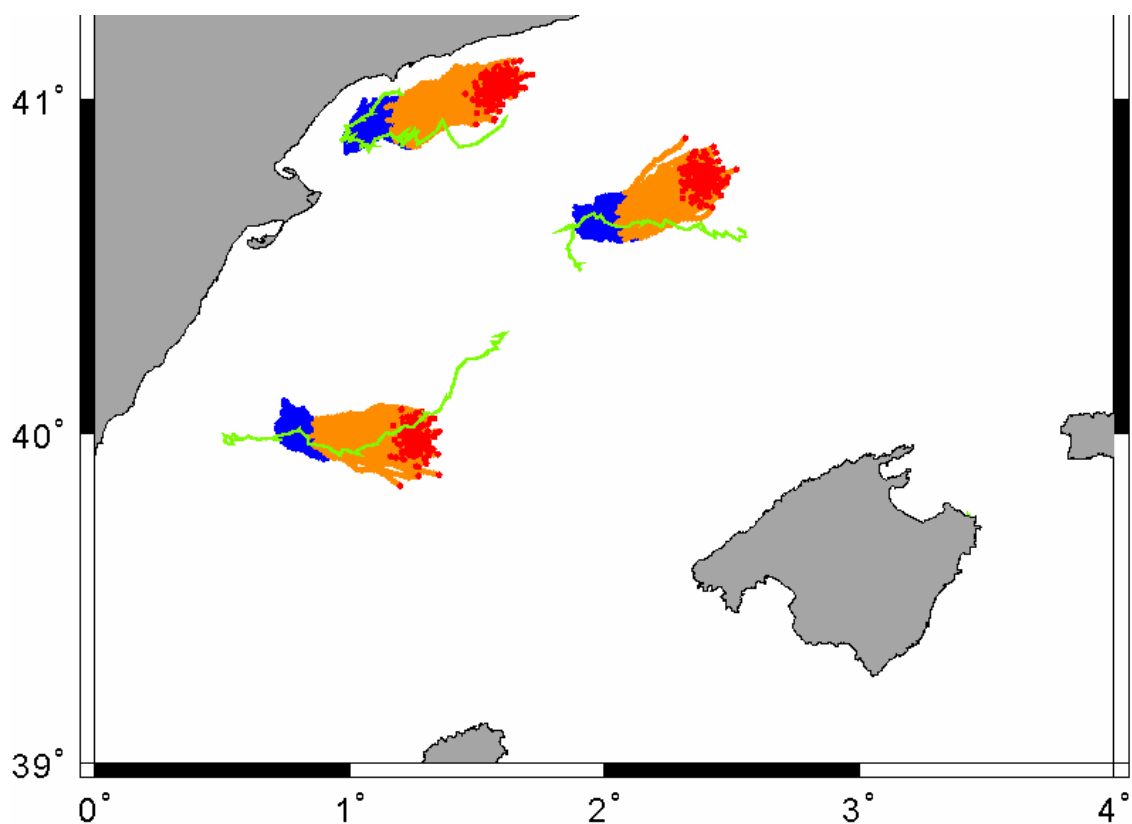
retroanálisis. Para ello se van a confeccionar simulaciones asignándole a este factor valores de 0.05, 0.1 y 0.15 para posteriormente analizar las diferencias.

- El radio inicial con el que se ha procedido a ejecutar las representaciones depende del factor turbulento y de la duración de la simulación tal y como se especificó en el apartado 4.3. En la tabla 4.3 se presentan los valores específicos que se han asignado :

Factor turbulento ( $\sigma^2$ )	Diámetro inicial de la mancha	
	24h	48h
<b>0.05</b>	14,13 Km	17,58 Km
<b>0.1</b>	27,46 Km	34,9 Km
<b>0.15</b>	39,96 Km	52.19 Km

**Tabla 4.3:** Diámetros medios asociados a un factor turbulento y a una duración de la simulación.

Una vez concluida la asignación de valores de los diferentes parámetros determinantes se ha procedido a la realización de las diferentes simulaciones alternando la duración de la previsión, factor turbulento y por consiguiente, el diámetro inicial de la mancha para los diferentes instantes de vertido. A continuación se muestra en la Figura 4.22 a modo de ejemplo los resultados obtenidos para la simulación de las boyas 95743, 95744 y 95745 con factor turbulento de 0.1 y una duración del retroanálisis de -48h. Las fechas en las cuales se encuentra comprendido este estudio son entre el día 30/09/09 y el 28/09/09



**Figura 4.22:** Simulación por las boyas 95743, 95743 y 95743 con radio inicial 3490m.  $\sigma^2=0.1$ , duración -48h.



En la figura 4.22 se observa como la trayectoria que siguen las partículas se asemeja en gran medida a la que habían descrito las boyas, pero para hacer un análisis más exhaustivo del correcto funcionamiento del modelo en modo retroanálisis se deberá estudiar el comportamiento del mismo en dos aspectos: el decrecimiento del radio con el tiempo y la exactitud de los resultados.

Estudiar el correcto funcionamiento del modelado numérico únicamente mediante los datos y los gráficos obtenidos se consideró insuficiente, ya que únicamente se podía garantizar cualitativamente que las aproximaciones obtenidas seguían en mayor o menor medida la dirección y el sentido adecuados. Además, en lo que al decrecimiento del radio se refiere, aparentemente permanece constante o incluso puede parecer que crece ligeramente.

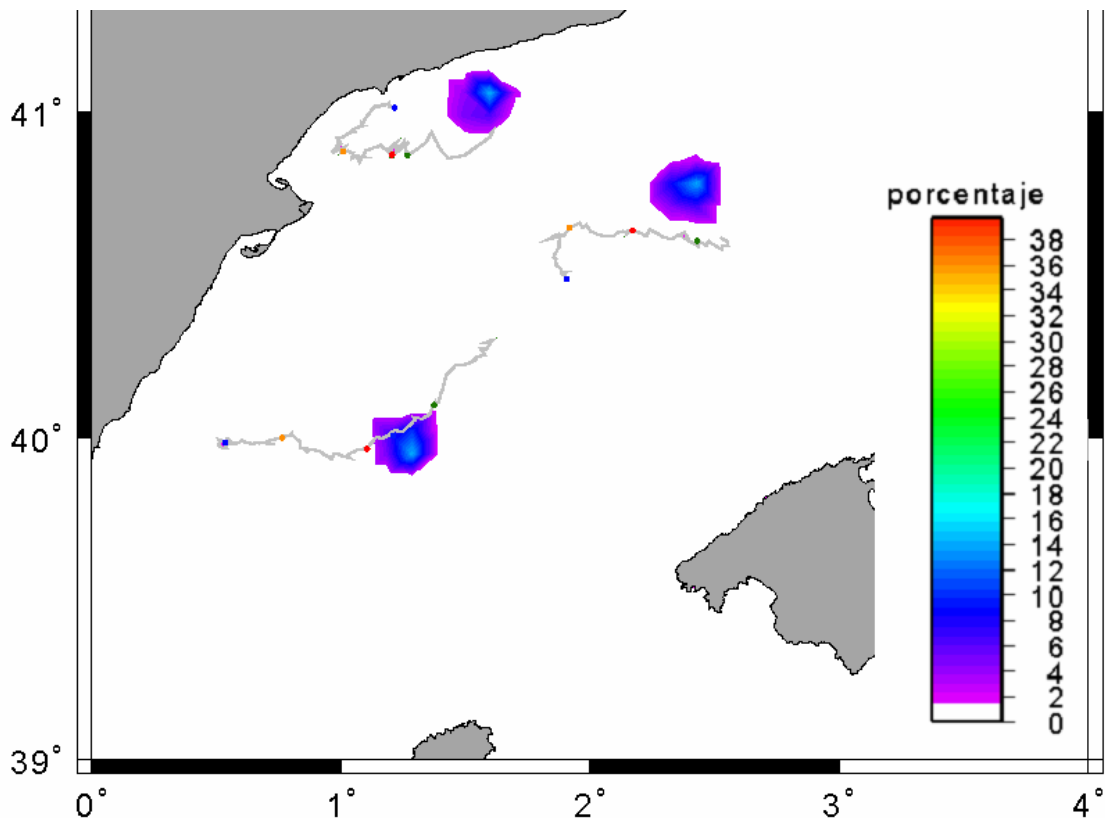
Para refinar este análisis se generó otro programa con el cual se consiguió alcanzar un nivel de precisión mas elevado y de este modo poder proceder a hacer un análisis cuantitativo de los resultados.

Este programa en particular hace un estudio de la distribución de las partículas en el instante final de la simulación y genera un mapa de probabilidad de presencia de las partículas en relación al número total de partículas vertidas. El funcionamiento es el siguiente:

1. Se introducen las coordenadas de las partículas en el instante -24h o -48h según la duración de la simulación. Por ejemplo en la figura 4.22 estas partículas vienen representadas con el color rojo.
2. El programa identifica las partículas con coordenadas con mayor y menor longitud y latitud generando así un área de trabajo.
3. Se subdivide dicha área en una malla con un número de celdas determinado.
4. El programa identifica el número de partículas que hay en cada celda y calcula el porcentaje que representan respecto el total. Automáticamente el programa asigna al punto central de la celda el valor del porcentaje calculado.
5. A continuación se asocian entre si las celdas con un porcentaje comprendido entre dos valores determinados y se genera un mapa de probabilidad de presencia de partículas.

A continuación, en la figura 4.23 se muestra los resultados obtenidos para el mismo caso que en la figura 4.23 pero una vez realizada la aplicación de este programa. Las trayectorias de las boyas en este caso se han pintado de color gris y sobre ellas se han posicionado unos puntos que representan las coordenadas de cada una de ellas en los instantes:

01/10/09 a las 12:00	Azul oscuro
30/09/09 a las 12:00	Naranja
29/09/09 a las 12:00	Rojo
28/09/09 a las 12:00	Verde

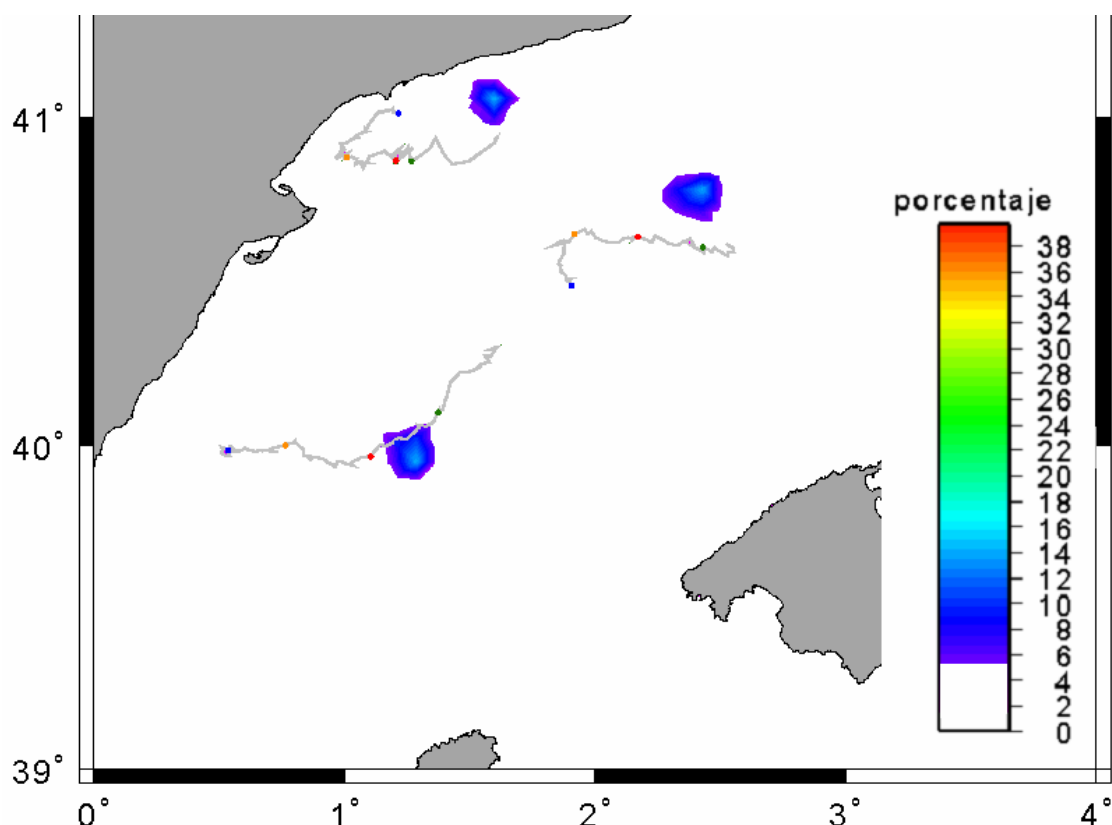


**Figura 4.23:** : Simulación par las boyas 95743, 95743 y 95743 con radio inicial 3490m.  
 $\sigma^2=0.1$ , duración -48h.

En los resultados representados en la Figura 4.23 se ve claramente como la mayoría de las partículas se concentra en la parte azul de las manchas y que en cierta medida los resultados se aproximan razonablemente al los puntos que ocuparon las boyas en el día 28/09 (Punto de color verde). En lo que concierne al tamaño final de la mancha podemos afirmar que en cualquier caso tiende a decrecer tal y como sería inferido en un proceso de retroanálisis. Si bien el tamaño final no es el que se esperaría, hay que considerar que existen varios factores que concursan en contra de conseguir un tamaño razonablemente aproximado al supuesto, los dos más importantes de ellos son:

1. La incertidumbre en la condiciones turbulentas del medio (varianza de la componente turbulenta de la velocidad) y
2. La incertidumbre de la variabilidad espacial y temporal del viento y cómo se transfieren estas fuerzas al objeto transportado.

Siguiendo este criterio, se ha procedido a desestimar ese conjunto de partículas, obteniendo de este modo unas superficies características de la mancha mucho menores. En la figura 4.24 se han eliminado las curvas de densidades correspondientes al intervalo 1%-5% y como se puede observar las superficies que abarcan las manchas en este caso son notablemente menores, lo cual nos permitiría predecir tamaños de vertido más realistas.



**Figura 4.24:** Simulación con radio inicial 1000m.  $\sigma^2=0.1$ , duración 24h. Radio medio: 47.78Km

Una vez asignado el criterio con el que se va a desarrollar el análisis se procedió a realizar toda la casuística de resultados con el objetivo de elaborar un estudio cuantitativo del error de exactitud de los resultados y del decrecimiento del radio con el tiempo en el modelo.

El error de exactitud del modelo en modo retroanálisis se ha estudiado determinando la distancia del punto de más probabilidad de las manchas al punto que ocupaba la boya correspondiente en ese instante. En la figura 4.24 esta distancia sería la comprendida entre el punto azul claro de cada mancha hasta el punto rojo de la trayectoria de la boya pertinente. El estudio del decrecimiento del diámetro de los vertidos virtuales se ha llevado a cabo asemejando la forma de las manchas a una elipse y se ha calculado la semisuma de los ejes.

Con los resultados obtenidos de todas las simulaciones realizadas se han elaborado las siguientes tablas con el objetivo de resaltar las conclusiones más significativas. El conjunto de todos los resultados está adjuntado en el Anejo 3.

Simulaciones 24h	factor turbulento					
	0.05		0.1		0.15	
	Radio	Error	Radio	Error	Radio	Error
<b>Valor Medio</b>	7,21 Km	12,88 Km	14,09 Km	11,96 Km	17,78 Km	9,68 Km
<b>Desviación</b>	0,96 Km	4,35 Km	1,12 Km	4,52 Km	1,51 Km	3,89 Km

**Tabla 4.4:** Error de exactitud y radio de la mancha para cada factor turbulento. Simulaciones de 24h de duración

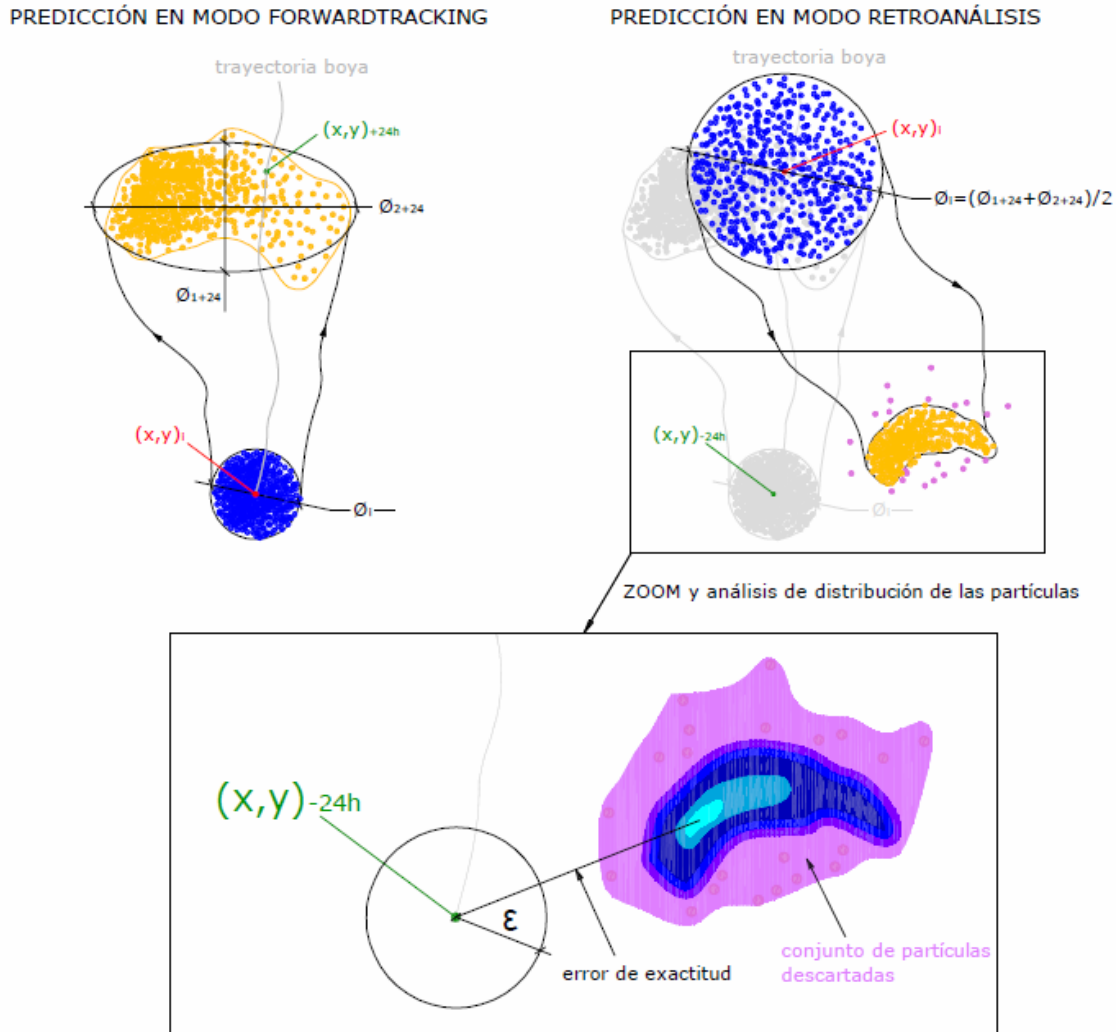
Simulaciones 48h	factor turbulento					
	0.05		0.1		0.15	
	Radio	Error	Radio	Error	Radio	Error
<b>Valor Medio</b>	12,78 Km	18,79 Km	22,18 Km	16,29 Km	30,37 Km	14,80 Km
<b>Desviación</b>	2,63 Km	8,18 Km	4,52 Km	5,68 Km	5,42 Km	7,77 Km

**Tabla 4.5:** Error de exactitud y diámetro de la mancha para cada factor turbulento. Simulaciones de 48h de duración

Analizando los resultados sintetizados en las Tablas 4.4 y 4.5, se pueden advertir una serie de relaciones que dan lugar a las siguientes conclusiones:

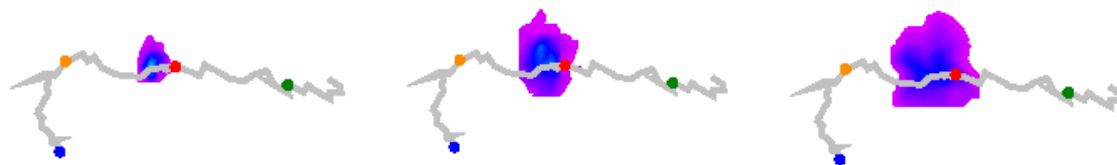
1. El error medio calculado en todos los casos tiene una magnitud considerable y puede dar lugar a escepticismos sobre el correcto funcionamiento del modelado en modo retroanálisis. En cambio, si se contextualiza el problema se puede comprobar que los resultados son en realidad considerablemente correctos ya que en la predicción del transporte de hidrocarburos constantemente se presentan incertidumbres en casi todos los aspectos del proceso:
  - Los modelos de transporte de hidrocarburos utilizan parametrizaciones empíricas y aproximaciones imperfectas a las leyes de la hidrodinámica.
  - Asumimos que los datos suministrados que caracterizan la componente determinística del transporte superficial de los hidrocarburos, que en nuestro caso son los vientos y las corrientes que gobernaron el transporte advectivo, carecen de cualquier tipo de error.
  - El modelo numérico empleado para parametrizar la componente difusiva en el retroanálisis es un modelo estocástico lagrangiano que utiliza métodos probabilísticos para emular los procesos de subescala. Así se obtiene una nube de posiciones “candidatas” para la deriva de cada partícula.
  - Los datos experimentales con los que se contaba consistían únicamente en las trayectorias de 4 boyas durante un intervalo de 4 días. Además dichas boyas no partían desde el mismo punto, factor que ha desencadenado que cada boya se haya tratado como un caso independiente.
  - Para ejecutar el modelado numérico en modo retroanálisis se ha partido de unas condiciones iniciales imperfectas. Esto es así ya que durante la realización del estudio de los radios iniciales asociados a cada factor turbulento y duración de las simulaciones, se ha obtenido una distribución de partículas con una forma, un tamaño y una densidad determinadas. Posteriormente, durante el desarrollo del estudio del modo retroanálisis las manchas se han representado mediante una serie de partículas distribuidas aleatoriamente centradas en el punto donde se encontraba la boya en el instante inicial de la simulación. De este modo, la única característica que se ha conservado ha sido el radio medio, omitiendo así información fundamental acerca de la forma y la distribución de las partículas (Figura 4.25)
  - Tal y como se vio en el apartado 4.1, la calibración de la intensidad de aplicación de los forzamientos advectivos se ha abordado determinando un factor de vientos y de arrastre de corrientes uniforme en todo el dominio de estudio. En cambio, como se pudo ver en las figuras 4.3-4.7 la mejor combinación de ambos factores para cada boya se conseguía mediante asignándoles valores diferentes en cada caso. De hecho, si observamos la

figura 4.8 se puede ver claramente como gran parte de las trayectorias reales de las boyas no se ubican dentro del dominio de la aproximación.



**Figura 4.25:** Esquema del proceso de análisis

- Examinando los valores medios del error para los diferentes factores turbulentos correspondientes a las simulaciones de misma duración, se puede observar como los tres valores se asemejan en gran medida entre ellos. En realidad no solo el valor medio del error es prácticamente el mismo sino que además las manchas resultantes para cada caso se encuentran centradas alrededor de aproximadamente el mismo punto. En la figura 4.25 se muestra un caso en particular donde se observa como la asignación de valores de factores turbulentos diferentes únicamente genera una mayor dispersión de la mancha pero no distorsiona su posición. Analizando todas las aproximaciones elaboradas se ha podido comprobar que éste es un comportamiento unánime, circunstancia que pone de manifiesto que la varianza de las fluctuaciones de las velocidades es un factor de escala y no un factor de distorsión espacial.



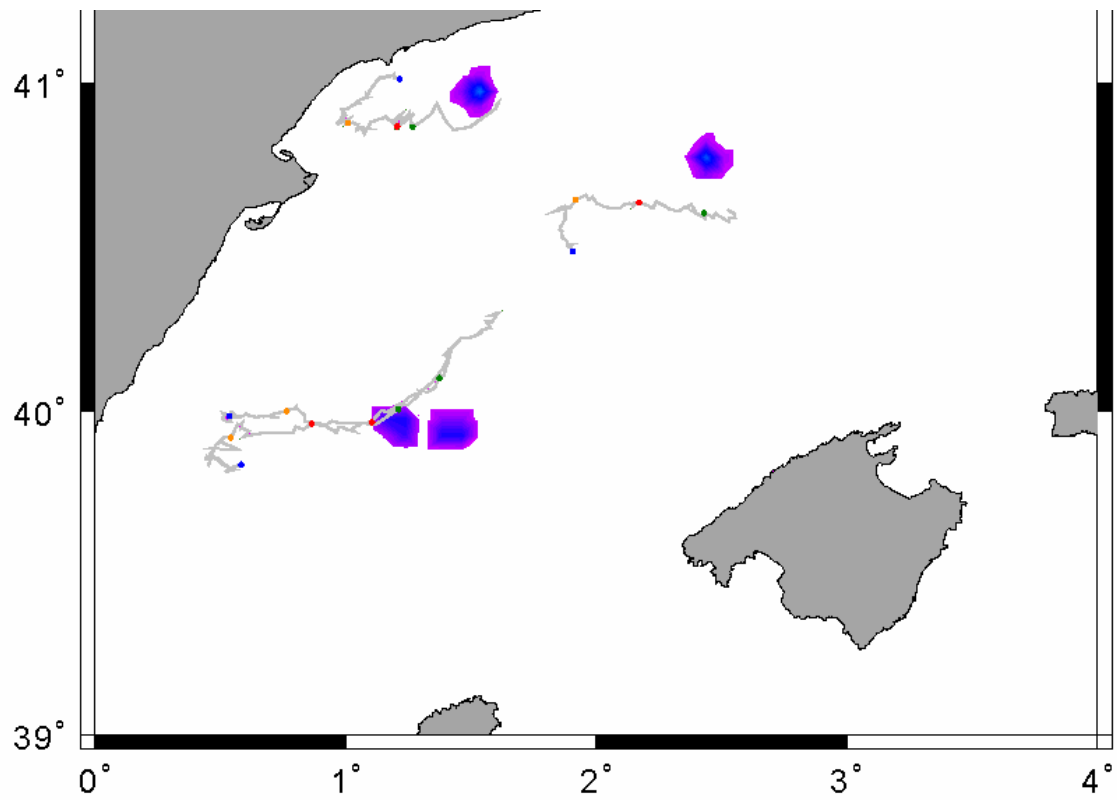
**Figura 4.26:** Simulaciones para diferentes factores turbulentos en la boya 95744

- Analizando los resultados adjuntos en el Anejo 3 desde otro punto de vista se ha confeccionado la Tabla 4.6. En ella se exponen los valores medios de los errores pero en este caso en función del instante inicial y la duración de la simulación:

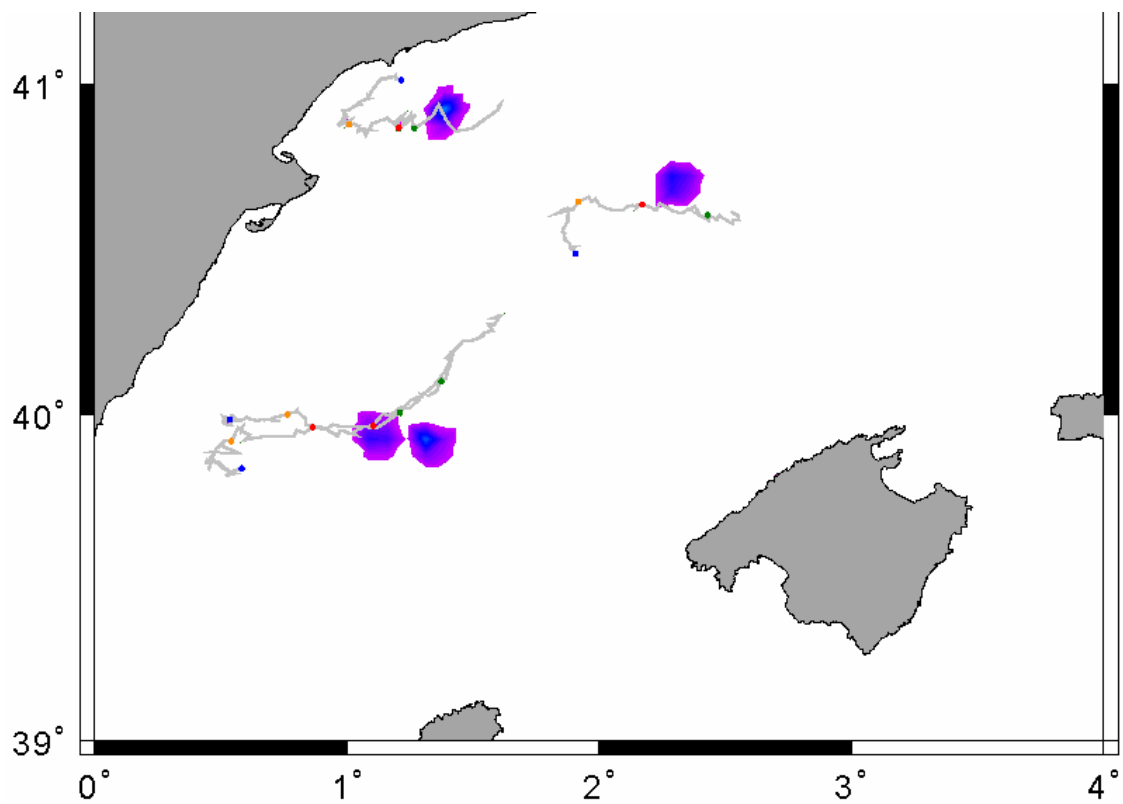
Inicio de simulación	Error medio -24h	Desviación	Error medio -48h	Desviación
<b>01/10/2009</b>	7,8 Km	2,11 Km	18,0 Km	6,7 Km
<b>30/09/2009</b>	8,0 Km	2,36 Km	16,6 Km	8,0 Km
<b>29/09/2009</b>	15,9 Km	1,81 Km	15,3 Km	6,8 Km
<b>28/09/2009</b>	14,3 Km	3,45 Km		

**Tabla 4.6:** Error medio de exactitud para cada fecha de inicio.

En la tabla 4.6 se percibe claramente como el error de exactitud del modelado numérico es relativamente homogéneo para las predicciones de -48h pero en cambio no lo es en absoluto para las predicciones de -24h. Este hecho ha suscitado que se proceda a estudiar más intensamente la componente advectiva del modelado numérico. Una de las imposiciones iniciales en el presente estudio fue asignar un valor uniforme en el espacio y constante en el tiempo para los factores de viento y de arrastre de corrientes. Anteriormente se ha comentado que asumir que estos factores son uniformes en el espacio da lugar a imprecisiones importantes. Asimismo, tal y como se puede ver en la Tabla 4.6, considerar dicho valor constante en el tiempo tampoco es una hipótesis adecuada ya que el error de exactitud para las simulaciones de duración -24h oscila entre valores significativamente diferentes. Por ejemplo el valor del error medio para las simulaciones con fecha inicial 29/09/2009 es prácticamente el doble que en las simulaciones realizadas para el 30/09/2009 o para el 01/10/2009. Con el objetivo de profundizar en este aspecto se examinó el estado del arte actual y se verificó que efectivamente asumir un factor de arrastre de viento constante en este tipo de aproximaciones puede dar lugar a predicciones erróneas (Allen, 2005 y Allen and Plourde, 1999). Para consolidar esta idea han realizado una serie de simulaciones de duración -24h con fecha de inicio 29/09/2009. En ellas se puede comprobar como el modelo es mas preciso si se disminuye el factor de viento. A continuación se adjunta en las figuras 4.26 y 4.27 el resultado inicial obtenido para la misma simulación con factor de arrastre de viento 5% y 3% respectivamente. En ellas se puede ver como para las boyas 95743 y 97546 (las situadas mas al sur-oeste) en el caso de factor de arrastre de viento 3% el error de exactitud aumenta ligeramente pero en cambio para las otras dos este error decrece ostensiblemente (Nótese que las boyas en el instante final de la simulación se encuentran en el punto verde de las trayectorias).



**Figura 4.27:** Simulación con fecha inicial 29/09/2009.  $\sigma^2=0.1$ , factor de arrastre de viento 5%.



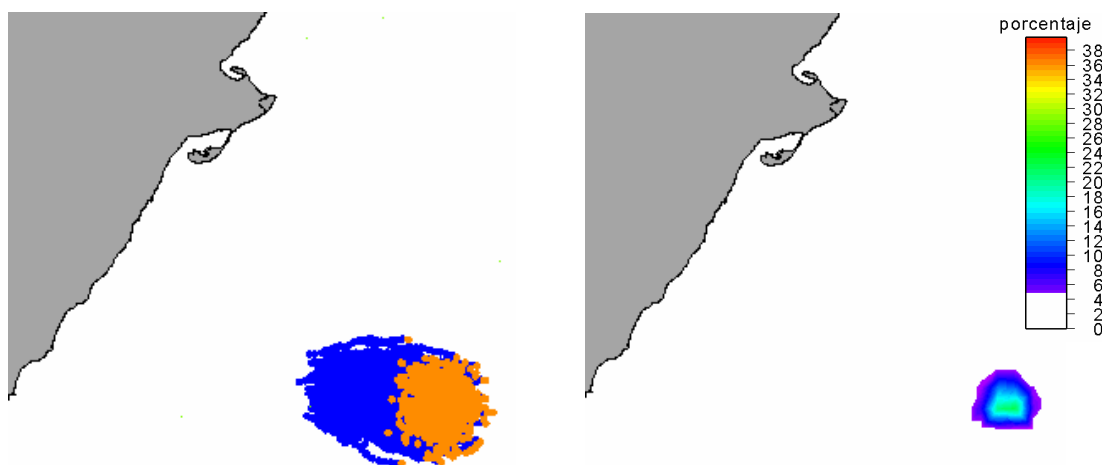
**Figura 4.28:** Simulación con fecha inicial 29/09/2009.  $\sigma^2=0.1$ , factor de arrastre de viento 3%.

4. Mediante los datos extraídos de los resultados del presente apartado se ha analizado la reducción del tamaño de la mancha. En la tabla 4.7 se muestra como los valores de los diámetros para el instante inicial de las simulaciones es claramente menor al diámetro de la mancha en el instante final. También se puede comprobar como el porcentaje de disminución para las aproximaciones de duración 24h es mayor que para las de 48h ya que en aproximaciones de 48h de duración se acumulan más errores de imprecisión debidas a la incertidumbre que albergan los procesos que gobiernan el transporte de hidrocarburos en el mar.

Factor turbulento	Diámetro de la mancha		Disminución	Diámetro de la mancha		Disminución
	0h	24h		0h	48h	
<b>0,05</b>	14,13 Km	7,21 Km	49%	17,58 Km	12,78 Km	27%
<b>0,1</b>	27,46 Km	14,09 Km	49%	34,9 Km	22,18 Km	36%
<b>0,15</b>	39,96 Km	17,78 Km	56%	52,19 Km	30,37 Km	42%

**Tabla 4.7:** Disminución media de los diámetros con el tiempo para simulaciones de -24 y -48h.

Finalmente, en la figura 4.29 que se muestra a continuación se ha querido poner de manifiesto el correcto funcionamiento del programa en este sentido haciendo una simulación para 5000 partículas y comprobando como efectivamente el diámetro de la mancha disminuye significativamente si despreciamos las curvas asociados a los porcentajes menores al 5%:



**Figura 4.29:** Simulación en modo retroanálisis con 5000 partículas.  
Trayectorias y probabilidad de presencia de partículas



CONCLUSIONES

---

*CAPÍTULO V*

A lo largo del desarrollo de esta tesina se han ido tratando diversos aspectos sobre la problemática que suponen los vertidos de hidrocarburos en el mar. En este capítulo se describen los resultados y las conclusiones de las investigaciones realizadas al respecto. Asimismo se proponen futuras perspectivas de trabajo que en base a los resultados aquí presentados ofrecerían una metodología físico-probabilística para la detección del origen de vertidos ilegales.

Sobre la contaminación marina por hidrocarburos:

- Una manera de clasificar la contaminación de origen marino es según las causas de la misma. En los **derrames de tipo accidental** (o mareas negras) como el accidente en la plataforma petrolífera de BP en el golfo de México, las consecuencias ambientales y socio-económicas de las zonas costeras afectadas son tan mediáticas como desastrosas y la gran mayoría de esos sucesos son debidos al envejecimiento-obsolescencia de la infraestructura vinculada a la extracción y el transporte de hidrocarburos. Existen sin embargo otras fuentes de contaminación marina asociadas a los **vertidos de tipo operacional** que consisten en vertidos poco voluminosos pero de carácter intencionado que se dan lugar durante las operaciones de carga y descarga. La prevención de los derrames accidentales pasa por renovar la infraestructura obsoleta y realizar inspecciones regulares de las infraestructuras que impulsen el correcto mantenimiento de las mismas. Sin embargo, si se pretenden erradicar los vertidos de tipo operacional se deberá impulsar la renovación de la flota petrolera imponiendo los compartimentos de lastrado y sobretodo se deberá intensificar las tareas de búsqueda de responsables mejorando los sistemas de investigación del origen de los vertidos ilegales.
- Independientemente del origen del vertido, una vez se ha localizado se debe llevar a cabo una gestión adecuada. La prevención y la previsión deben plantearse como herramienta fundamental de apoyo a la toma de decisiones en sucesos de este tipo. En la actualidad, la sinergia entre los sistemas observacionales de **oceanografía operacional** conjuntamente con los **modelados numéricos del transporte de hidrocarburos** constituyen la base de los sistemas de previsión de los planes de contingencia. Asimismo, la implementación del **retroanálisis** en un modelo numérico de *oil spill* hacen del sistema una herramienta eficaz para reconocer a los buques responsables de vertidos intencionados de hidrocarburos.

Sobre la predicción numérica del transporte de hidrocarburos vertidos al mar

- Los principios físicos que gobiernan el transporte de una sustancia en el medio marino caracterizan diversos flujos y patrones de circulación que actúan a **escalas espaciales y temporales muy diversas**. Para poder representar todos estos términos forzadores en un modelo de predicción numérica, el transporte superficial se descompone en una componente media y una turbulenta. De éste modo se podrá abordar el cálculo de cada componente de manera independiente y así generar una predicción numérica más versátil y eficaz.

- Un contaminante vertido en el mar se ve sometido al efecto del conjunto de los **forzamientos advectivos**. Estos son las predicciones de **viento, las corrientes y el oleaje**. La transformación de estos forzamientos en fuerzas efectivas en el modelo numérico se realiza mediante factores de arrastre. La imposibilidad de desasociar el efecto del viento y el oleaje ha suscitado que se considere la contribución de éste último a través de un incremento del factor de arrastre de viento.
- Para modelar el efecto en el transporte de las fluctuaciones de la velocidad se emplean comúnmente **modelos estocásticos Lagrangianos**. El valor de la varianza de estas fluctuaciones y de la escala de correlación Lagrangiana son característicos del flujo en el dominio de estudio. Con relación a este tipo de modelado, y dependiendo de la magnitud y características de la fluctuación con respecto al flujo medio se usan modelos *random walk* o modelos *random flight*.

#### Sobre la implementación del modelado de retroanálisis

- Los modelos numéricos de predicción del transporte de hidrocarburos utilizan forzamientos que son modelados a partir de información con errores e **incertidumbres**. Adicionalmente, para modelar los procesos físicos de subescala, se usan parametrizaciones calibradas de las dinámicas que los gobiernan (modelos estocásticos Lagrangianos).
- En el presente estudio se ha determinado que quizás los valores del **factor de arrastre de corrientes** y el **factor de arrastre de viento** deberían tomar valores variables en el tiempo y en el espacio, ya que considerar que el efecto de los forzamientos es uniforme en el espacio y constante en el tiempo puede dar lugar a la descripción de transportes alejados de la realidad.
- En el análisis de los resultados obtenidos sobre los efectos en el transporte de la **varianza de las fluctuaciones** de las velocidades se ha encontrado que este parámetro se comporta como un **factor de escala** en el tamaño final de la nube de partículas y no como un factor de distorsión direccional espacial. Por lo tanto, con el objetivo de mejorar la aplicación de estas metodologías en el futuro, se recomienda llevar a cabo estudios sobre la turbulencia del medio a través del lanzamiento de varias boyas Lagrangianas en diferentes puntos y posteriormente analizando el comportamiento dispersivo.
- Los **datos experimentales** con los que se ha contado en el presente trabajo han resultado escasos para validar los resultados del módulo de retroanálisis, ya que únicamente se ha podido hacer un **ejercicio de contraste** con las trayectorias de cuatro boyas consideradas cada una de ellas de forma individual. A la hora de validar los resultados, solo se disponía de una partícula para validar el comportamiento de una gran cantidad de ellas, es decir, únicamente se contaba se una realización puntual de la naturaleza para compararla con miles de relaciones numéricas con muchos grados de libertad, lo que no permite una validación objetiva del proceso de transporte.

- En el análisis del **modo *Forwardtracking*** se han representado los vertidos mediante una distribución aleatoria de un número determinado de partículas en el interior de un círculo cuyo radio se ha considerado una variable. Para cada simulación se han obtenido una **distribución de partículas** y un **tamaño de mancha** en el instante final, asociados al radio inicial y a la duración de la misma.
- En el análisis del **modo retroanálisis** únicamente se ha impuesto como **condición inicial** el radio obtenido en el análisis en modo forwardtracking. Con el objetivo de mejorar la aplicación de estas metodologías en el futuro se recomienda llevar a cabo estudios incluyendo igualmente como condiciones iniciales la información referente a la forma de la mancha y a la distribución de las partículas.
- Para **consolidar el retroanálisis** como sistema de apoyo a la investigación del **origen de vertidos del tipo operacional** se deberá mejorar la estrategia de estudio de los condicionantes que intervienen en los diferentes procesos para poder realizar descripciones más fidedignas del transporte de hidrocarburos vertidos en el mar.

## BIBLIOGRAFÍA Y WEBGRAFÍA

---

## *REFERENCIAS*

# BIBLIOGRAFÍA

- Comerma, E. (2004), Modelado numérico de la deriva y envejecimiento de los hidrocarburos vertidos al mar: aplicación operacional en la lucha contra las mareas negras. PhD thesis, UPC
- BP (2009). BP Statistical Review of World Energy - 2009. Ed. British Petroleum.
- CAMCAT (2003). Plan Especial de Emergencias por Contaminación Accidental de las Aguas Marinas. Dpt de Justica i Interior, SDG Protección Civil, Generalitat de Catalunya.
- ITOPF (2009). Oil Tanker Spill Statistics. International Tankers Owners Pollution Federation, London, 8pp.
- Zamora, J., (2003) La desgracia del Prestige. Informe, publicación personal, 101pp.
- Madrigal, R., (en elaboración), PhD thesis, UPC.
- Allen, A., (2005). Leeway Divergence. Government Report prepared for the U.S. Department of Homeland Security. January 2005.
- Allen, A. and Plourde, R., (1999). Review of Leeway: Field Experiments and Implementation. Contract report prepared for the U.S. Department of Transportation and U.S. Coast Guard. April 1999.
- Hackett, B., Breivik, Ø. and Wettre, C. (2004), Forecasting the Drift of Things and substances in the Ocean. Norwegian Meteorological Institute, Oslo, Norway
- Daniel, P., Janb, G., Cabioc'h, F., Landau Y., Loiseau E., (2002) Drift Modeling of Cargo Containers. Spill Science and Technology Bulletin, Volume 7, Number 5, December 2002 , pp. 279 - 288
- Griffa, A. (1996), Applications of stochastic particle models to oceanographic problems, Birkha&Uml; User Progress In Probability Series Volume 39. Stochastic modelling in physical oceanography, pp 113 - 140
- Spaulding, (2005), Integration of coastal ocean dynamics application radar (CODAR) and short-term predictive system (STPS) surface current estimates into the search and rescue optimal planning system (SAROPS)
- Delvigne, G.A.L. & Hulsen, L.J.M., (1994), Simplified laboratory measurement of oil dispersion coefficient—application in computations of natural oil dispersion. Proceedings of the 17th Arctic and Marine Oil Spill Program (AMOP) Technical Seminar, Environment Canada.
- Mestres, M., 2002, Three-dimensional simulation of pollutant dispersion in coastal waters. PhD thesis, UPC
- Flesch T.K. & Wilson J.D. (1995) Backward-Time Lagrangian Stochastic Dispersion Models and their Application to Estimate Gaseous Emissions

# WEBGRAFÍA

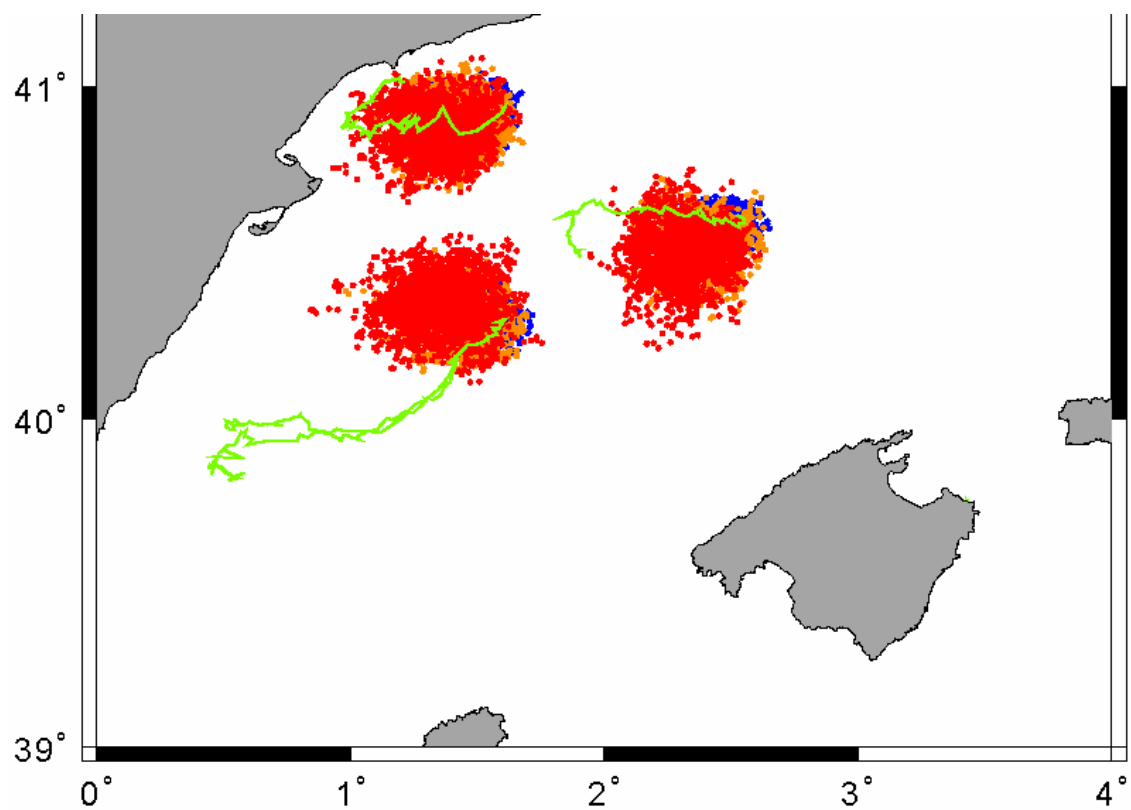
- Lloyd's Marine Intelligence Unit (LMIU)  
<http://www.seasearcher.com/lmiu/index.htm>
- CAMCAT  
[http://www20.gencat.cat/docs/interior/Home/Arees%20dactuacio/Proteccio%20Civil/Plans%20de%20proteccio%20civil/Plans%20de%20proteccio%20civil%20a%20Catalunya/Documents/camcat\\_prensa.pdf](http://www20.gencat.cat/docs/interior/Home/Arees%20dactuacio/Proteccio%20Civil/Plans%20de%20proteccio%20civil/Plans%20de%20proteccio%20civil%20a%20Catalunya/Documents/camcat_prensa.pdf)
- Internacional Tankers Owners Pollution Federation Ltd (ITOPF)  
<http://www.itopf.com>
- European Space Agency  
<http://www.esa.int/export/esaCP>
- Meteo-France  
<http://france.meteofrance.com>
- Puertos del Estado  
<http://www.puertos.es>
- Soluciones de ingeniería marítima operacional (SIMO)  
<http://www.simo.cat>
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)  
<http://www.noaa.gov>
- Huffington post  
<http://www.huffingtonpost.com>
- Greenpeace  
<http://www.greenpeace.org/international>
- National geographic  
<http://www.nationalgeographic.com.es>
- CONservation of Clean Air and Water in Europe (CONCAWE)  
<http://www.concawe.be>

SIMULACIONES PARA LA CARACTERIZACIÓN DE  
LOS PARÁMETROS DEL ESCENARIO DE ESTUDIO

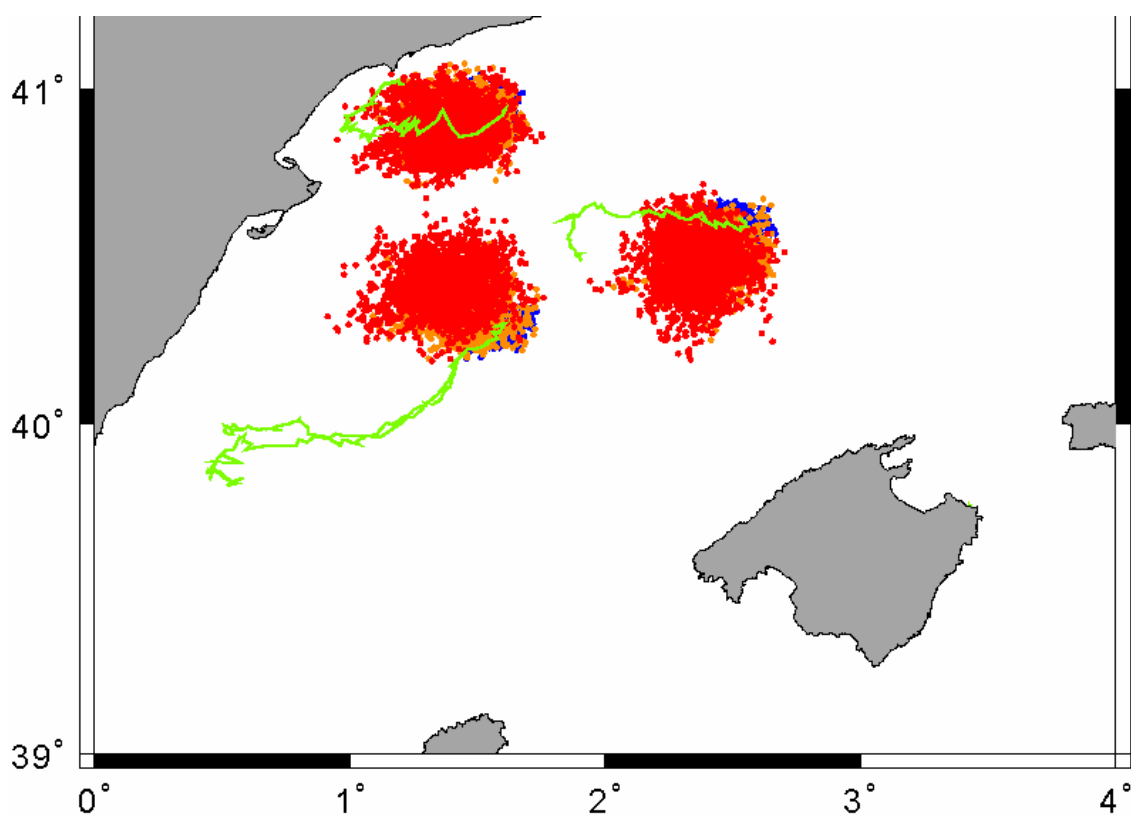
---

*ANEJO I*

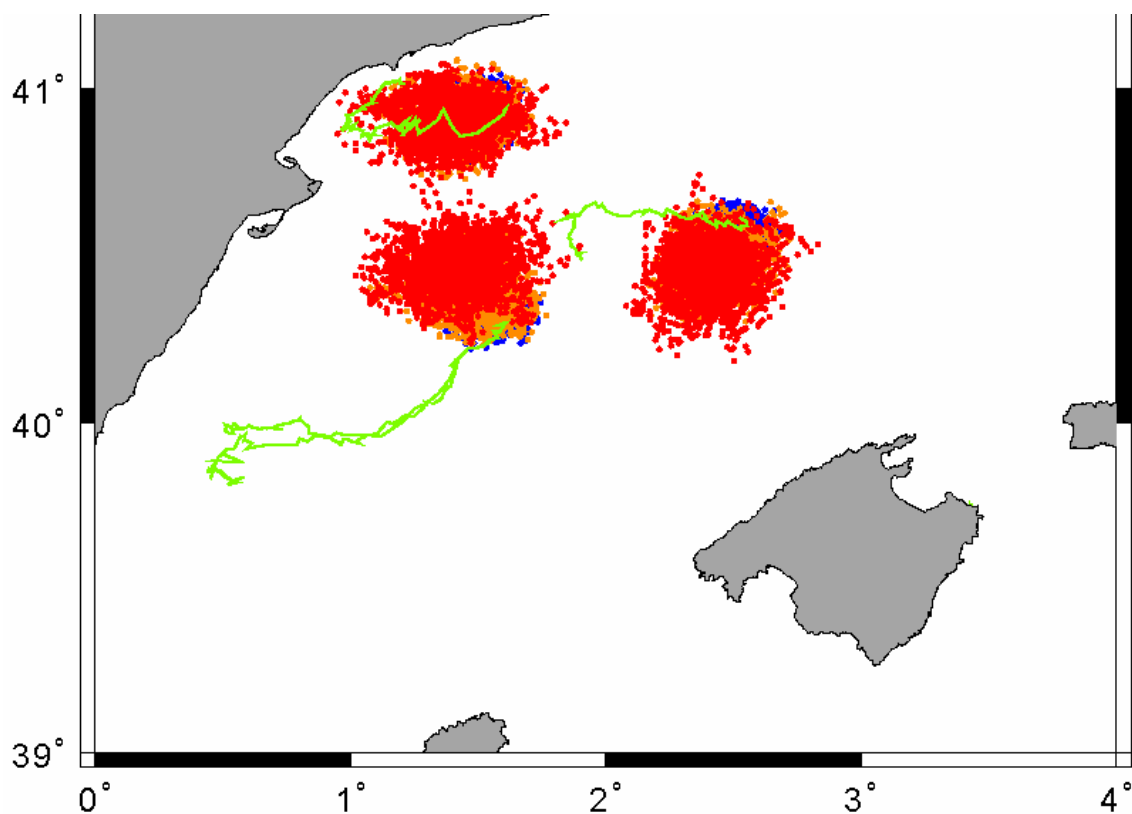




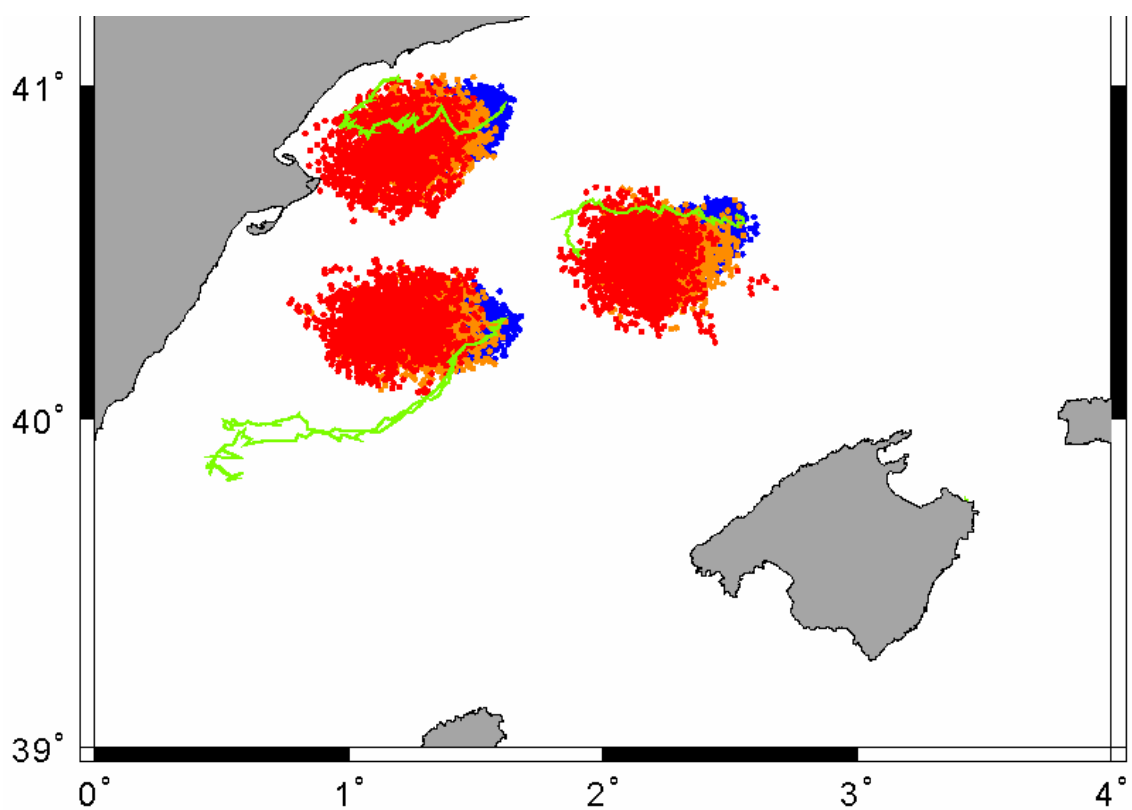
**Figura I.1:** Simulación para: factor de viento 2% factor de arrastre de las corrientes 0.5



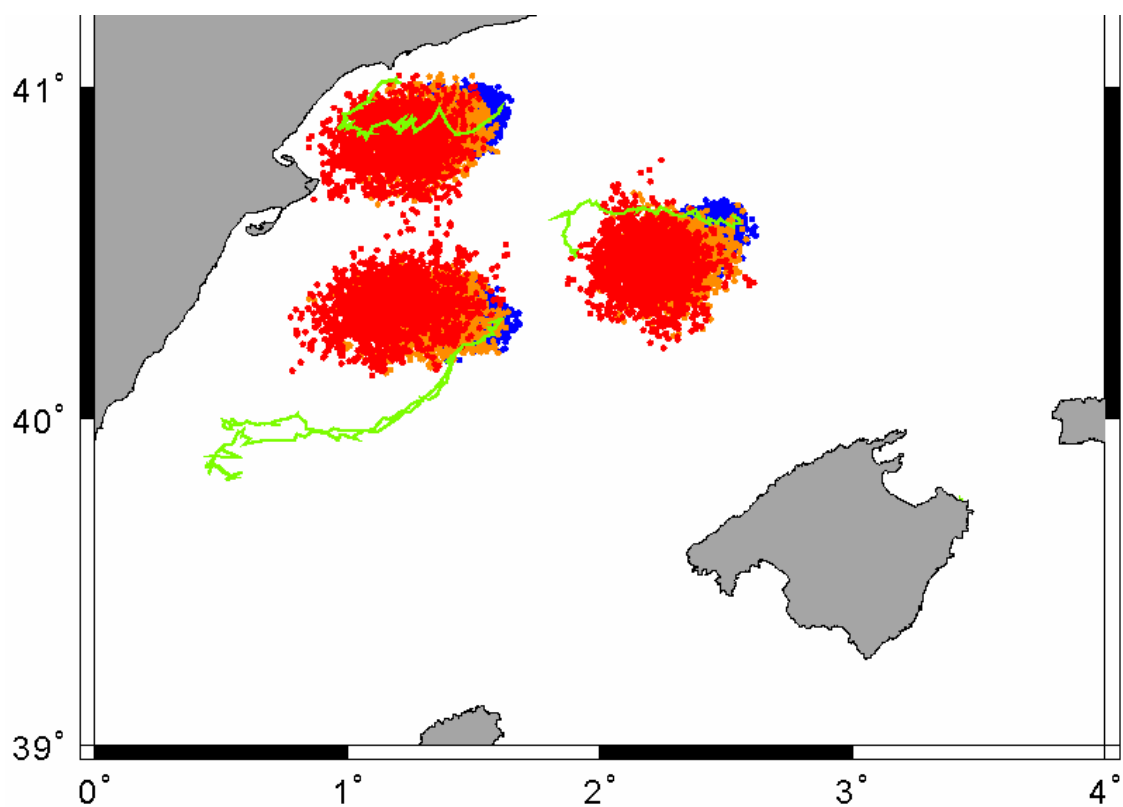
**Figura I.2:** Simulación para: factor de viento 2% factor de arrastre de las corrientes 0.75



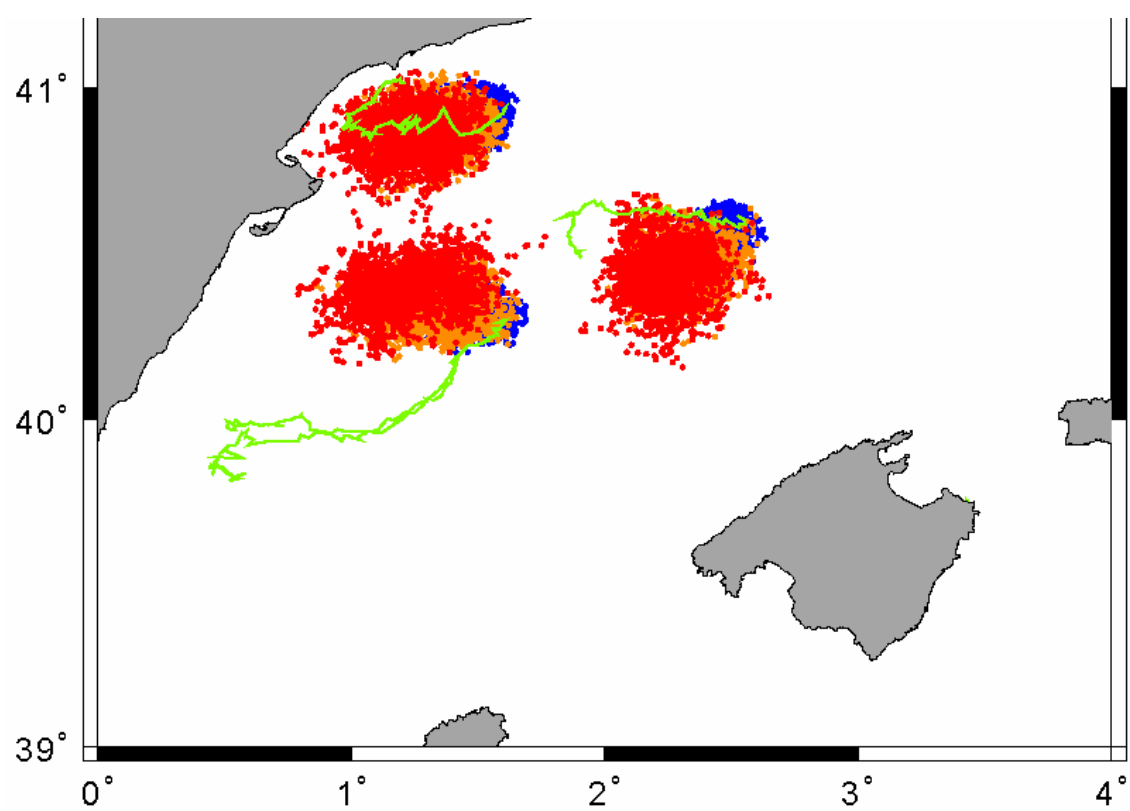
**Figura I.3:** Simulación para: factor de viento 2% factor de arrastre de las corrientes 1.0



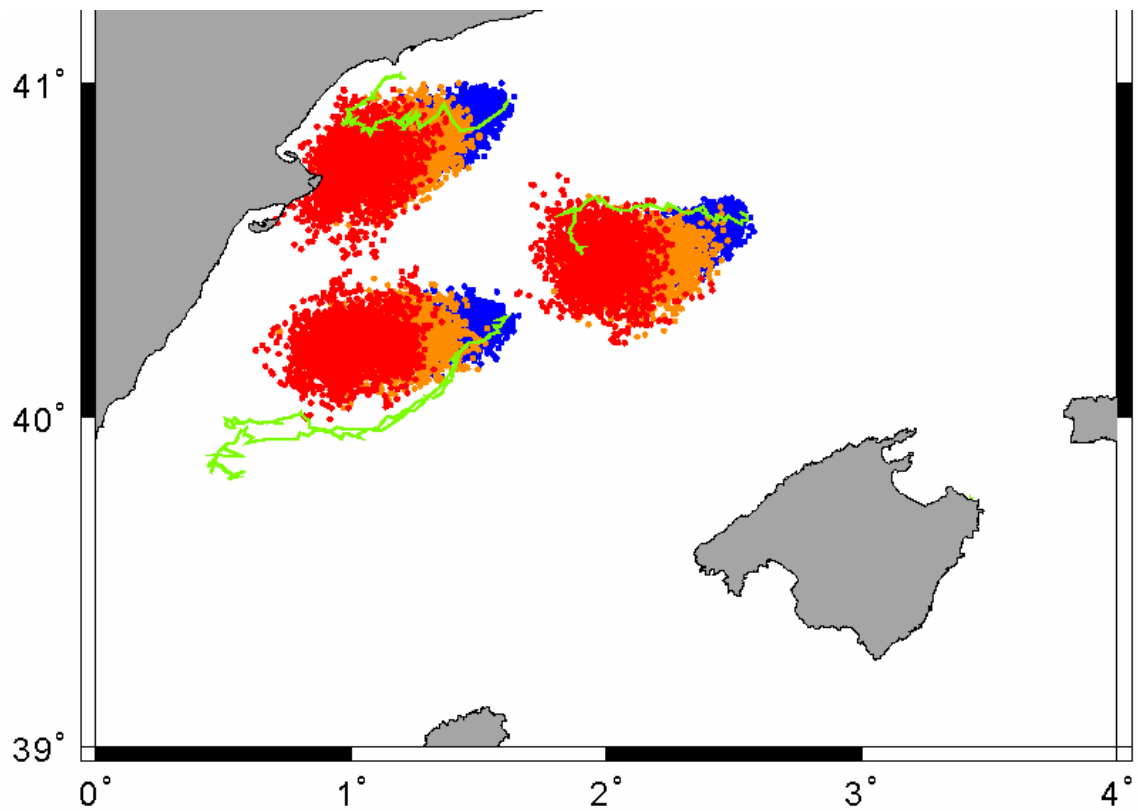
**Figura I.4:** Simulación para: factor de viento 3% factor de arrastre de las corrientes 0.5



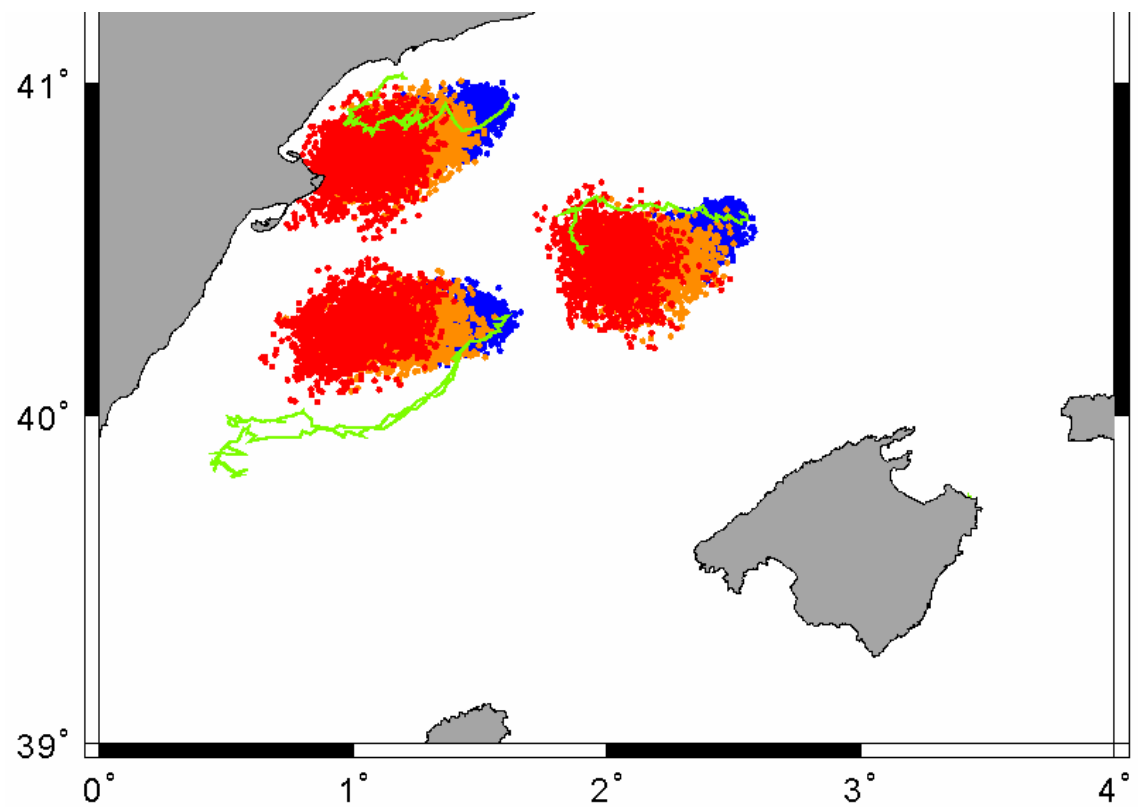
**Figura I.5** Simulación para: factor de viento 3% factor de arrastre de las corrientes 0.75



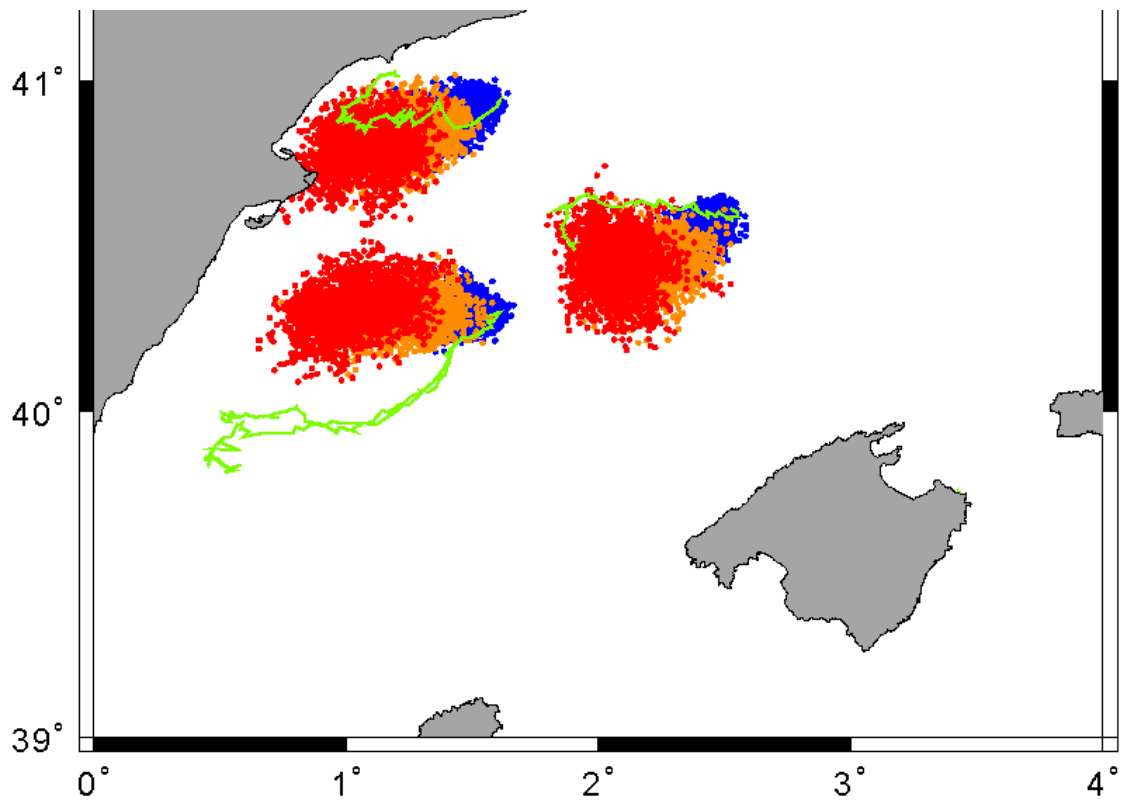
**Figura I.6:** Simulación para: factor de viento 3% factor de arrastre de las corrientes 1.0



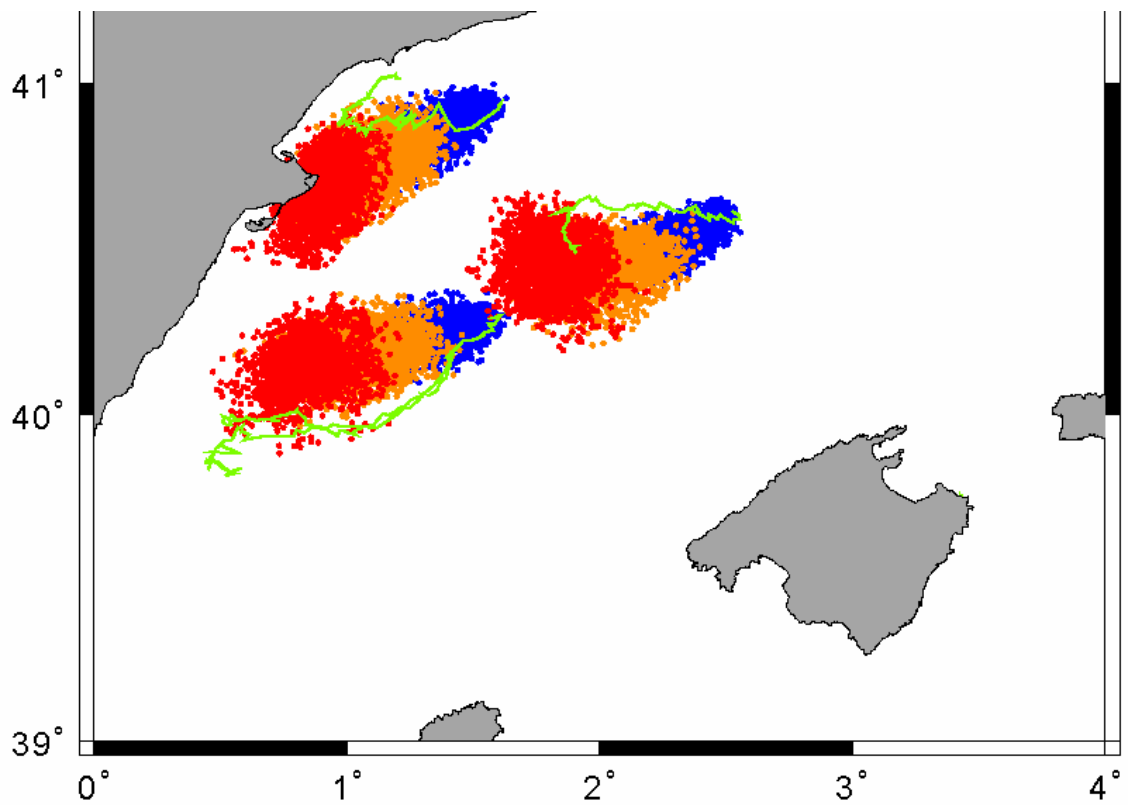
**Figura I.7:** Simulación para: factor de viento 4% factor de arrastre de las corrientes 0.5



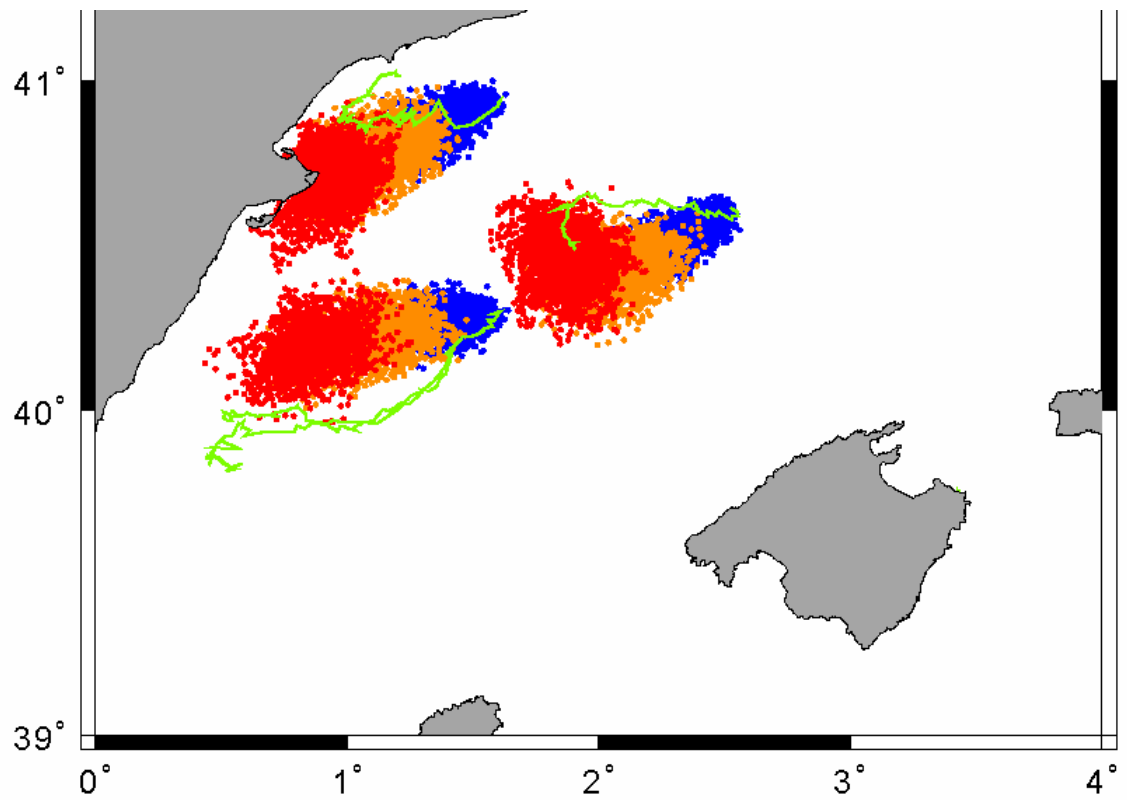
**Figura I.8:** Simulación para: factor de viento 4% factor de arrastre de las corrientes 0.75



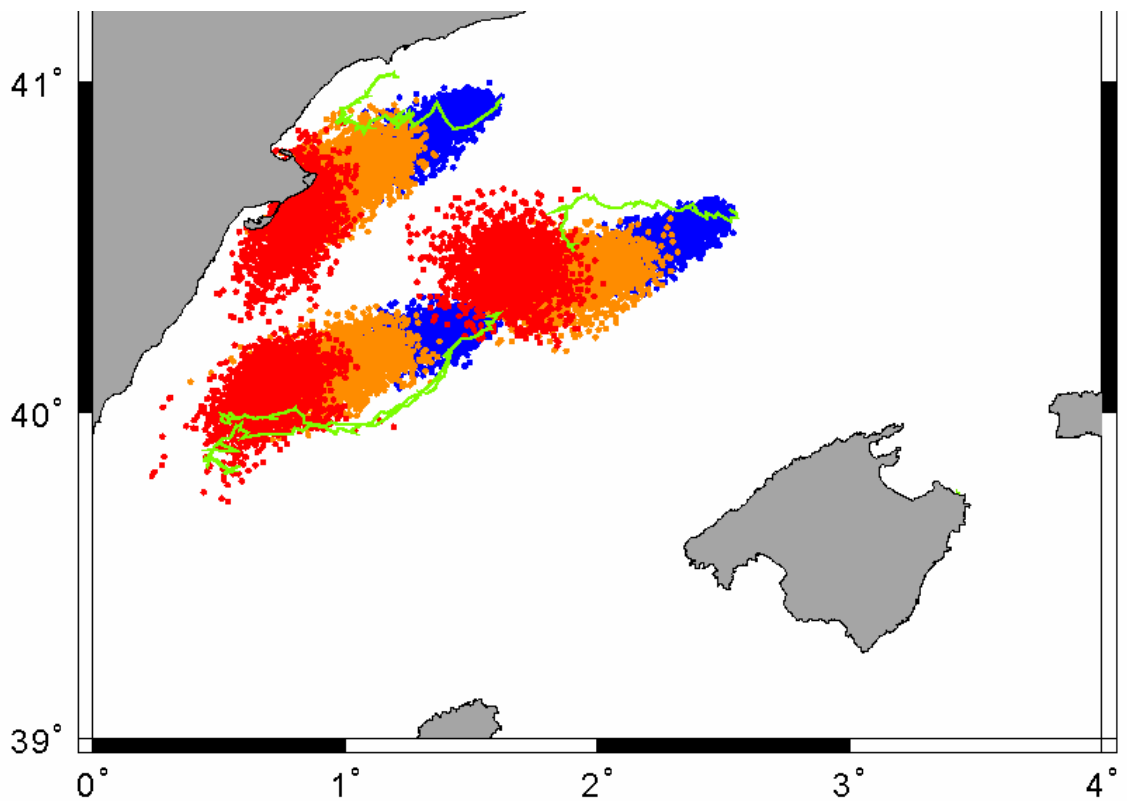
**Figura I.9:** Simulación para: factor de viento 4% factor de arrastre de las corrientes 1.0



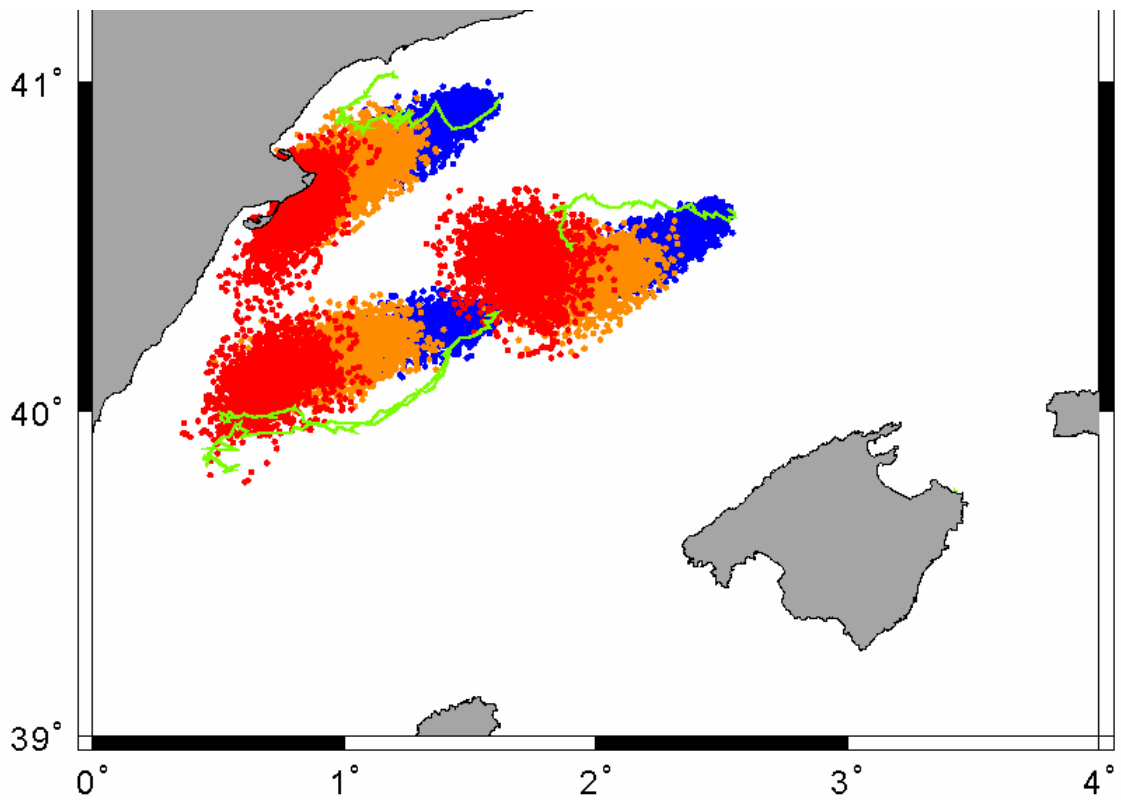
**Figura I.10:** Simulación para: factor de viento 5% factor de arrastre de las corrientes 0.5



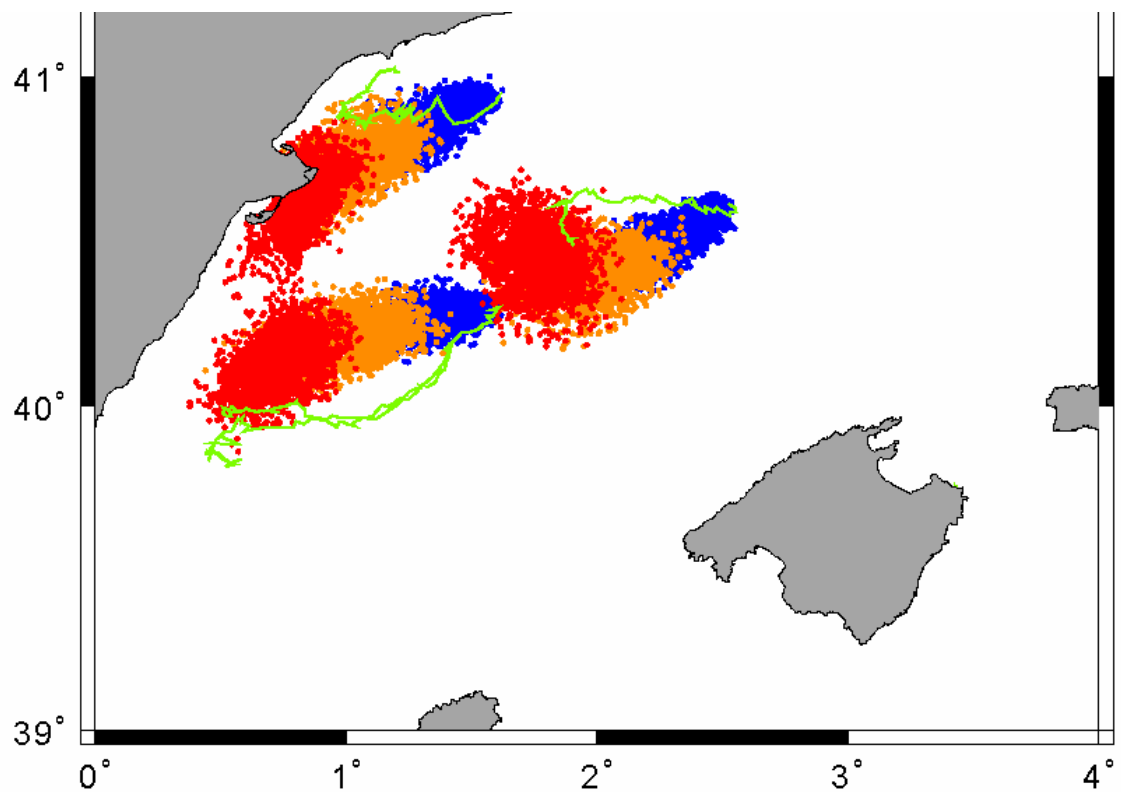
**Figura I.11:** Simulación para: factor de viento 5% factor de arrastre de las corrientes 0.75



**Figura I.12:** Simulación para: factor de viento 6% factor de arrastre de las corrientes 0.5



**Figura I.13:** Simulación para: factor de viento 6% factor de arrastre de las corrientes 0.75



**Figura I.14:** Simulación para: factor de viento 6% factor de arrastre de las corrientes 1.0

SIMULACIONES PARA EL CÁLCULO DE LAS  
CONDICIONES INICIALES. RESULTADOS

---

*ANEJO 2*



Boya	Instante	Coordenadas		Duración (fechas)		factor turbulento		
97543		lat	lon			0.05	0.1	0.15
	0h	40.294	1.593	27-28		22,22 Km	44,44 Km	66,67 Km
	24h	40.101	1.374	28-29		21,11 Km	45,56 Km	69,44 Km
	48h	39.966	1.105	29-30		24,44 Km	46,67 Km	65,56 Km
97544	72h	40	0.764	31-01		23,33 Km	44,44 Km	71,11 Km
	0h	40.616	2.526	27-28		25,56 Km	47,78 Km	72,22 Km
	24h	40.605	2.431	28-29		24,44 Km	47,78 Km	73,33 Km
	48h	40.638	2.171	29-30		23,33 Km	44,44 Km	65,56 Km
97545	72h	40.646	1.919	31-01		22,22 Km	47,78 Km	68,89 Km
	0h	40.933	1.599	27-28		24,44 Km	38,89 Km	58,89 Km
	24h	40.867	1.267	28-29		25,56 Km	impacto	impacto
	48h	40.87	1.206	29-30		24,44 Km	34,44 Km	impacto
97546	72h	40.878	1.011	31-01		impacto	impacto	impacto
	0h	40.192	1.413	27-28		25,56 Km	52,22 Km	71,11 Km
	24h	40.005	1.209	28-29		24,44 Km	51,11 Km	72,22 Km
	48h	39.962	0.864	29-30		24,44 Km	46,67 Km	67,78 Km
	72h	39.919	0.542	31-01		impacto	53,33 Km	65,56 Km
						335,56 Km	645,55 Km	888,33 Km
				nº de casos válidos	14	14	13	
				media	23,97 Km	46,11 Km	68,33 Km	

Tabla II.1: Radios medios para las simulaciones de vertidos con radio inicial 1000m y duración de las simulaciones 24h

Boya	Instante	Coordenadas		Duración (fechas)		factor turbulento	
97543		lat	lon			0.05	0.1
	0h	40.294	1.593	27--29	31,11 Km	57,78 Km	86,67 Km
	24h	40.101	1.374	28--30	32,22 Km	56,67 Km	88,89 Km
	48h	39.966	1.105	29--01	33,33 Km	64,44 Km	97,78 Km
97544		lat	lon				
	0h	40.616	2.526	27--29	27,78 Km	58,89 Km	91,11 Km
	24h	40.605	2.431	28--30	25,56 Km	55,56 Km	88,89 Km
	48h	40.638	2.171	29--01	31,11 Km	61,11 Km	92,22 Km
97545		lat	lon				
	0h	40.933	1.599	27--29	30,00 Km	impacto	impacto
	24h	40.867	1.267	28--30	impacto	impacto	impacto
	48h	40.87	1.206	29--01	31,11 Km	impacto	impacto
97546		lat	lon				
	0h	40.192	1.413	27--29	28,89 Km	55,56 Km	86,67 Km
	24h	40.005	1.209	28--30	30,00 Km	76,67 Km	100,00 Km
	48h	39.962	0.864	29--01	34,44 Km	80,00 Km	116,67 Km
				nº de casos válidos	335,55522 Km	566,6661 Km	848,88804 Km
				media	11	9	9
					30,51 Km	62,96 Km	94,32 Km

Tabla II.2: Radios medios para las simulaciones de vertidos con radio inicial 1000m y duración de las simulaciones 48h

Boya	Instante	Coordenadas		Duración (fechas)	factor turbulento		
97543		lat	lon		0.05	0.1	0.15
	0h	40.294	1.593	27--28	14,44 Km	26,67 Km	40,00 Km
	24h	40.101	1.374	28--29	15,56 Km	27,78 Km	42,22 Km
	48h	39.966	1.105	29--30	15,00 Km	28,89 Km	42,22 Km
	72h	40	0.764	31--01	16,67 Km	28,89 Km	41,11 Km
97544		lat	lon				
	0h	40.616	2.526	27--28	14,44 Km	28,89 Km	42,22 Km
	24h	40.605	2.431	28--29	15,00 Km	28,33 Km	41,67 Km
	48h	40.638	2.171	29--30	14,44 Km	27,22 Km	36,67 Km
	72h	40.646	1.919	31--01	15,56 Km	30,00 Km	41,11 Km
97545		lat	lon				
	0h	40.933	1.599	27--28	14,44 Km	28,89 Km	42,22 Km
	24h	40.867	1.267	28--29	15,00 Km	30,00 Km	42,78 Km
	48h	40.87	1.206	29--30	14,44 Km	25,56 Km	40,00 Km
	72h	40.878	1.011	31--01	15,56 Km	24,44 Km	39,44 Km
97546		lat	lon				
	0h	40.192	1.413	27--28	13,89 Km	27,78 Km	40,00 Km
	24h	40.005	1.209	28--29	13,33 Km	26,11 Km	41,11 Km
	48h	39.962	0.864	29--30	13,33 Km	25,56 Km	38,89 Km
	72h	39.919	0.542	31--01	14,44 Km	31,11 Km	42,22 Km
				nº de casos válidos	16	16	16
				media	14.72 Km	27.88 Km	40.87 Km

Tabla II.3: Radios medios para las simulaciones de vertidos con radio inicial 250m y duración de las simulaciones 24h

Boya	Instante	Coordenadas		Duración (fechas)		factor turbulento		
97543		lat	lon			0.05	0.1	0.15
	0h	40.294	1.593	27--29	16,67 Km	31,11 Km		47,78 Km
	24h	40.101	1.374	28--30	17,78 Km	30,00 Km		47,78 Km
	48h	39.966	1.105	29--01	19,44 Km	32,22 Km		51,11 Km
97544		lat	lon					
	0h	40.616	2.526	27--29	18,89 Km	35,56 Km		50,00 Km
	24h	40.605	2.431	28--30	18,33 Km	33,33 Km		48,89 Km
	48h	40.638	2.171	29--01	17,78 Km	33,33 Km		49,44 Km
97545		lat	lon					
	0h	40.933	1.599	27--29	18,89 Km	31,11 Km		Impacto
	24h	40.867	1.267	28--30	Impacto	Impacto		Impacto
	48h	40.87	1.206	29--01	18,89 Km	30,00 Km		Impacto
97546		lat	lon					
	0h	40.192	1.413	27--29	18,89 Km	38,89 Km		48,89 Km
	24h	40.005	1.209	28--30	19,44 Km	45,56 Km		60,00 Km
	48h	39.962	0.864	29--01	18,89 Km	44,44 Km		66,67 Km
				nº de casos válidos		203,888685 Km	385,55517 Km	470,555085 Km
				media		11	11	9
						18,54 Km	35,05 Km	52,28 Km

Tabla II.4: Radios medios para las simulaciones de vertidos con radio inicial 250m y duración de las simulaciones 48h

Boya	Instante	Coordenadas		Duración (fecha)	factor turbulento		
97543		lat	lon		0.05	0.1	0.15
	0h	40.294	1.593	27--28	13,33 Km	27,78 Km	40,00 Km
	24h	40.101	1.374	28--29	12,78 Km	27,22 Km	38,89 Km
	48h	39.966	1.105	29--30	14,44 Km	27,78 Km	38,33 Km
	72h	40	0.764	31--01	13,33 Km	26,67 Km	38,89 Km
97544		lat	lon				
	0h	40.616	2.526	27--28	15,56 Km	27,78 Km	40,00 Km
	24h	40.605	2.431	28--29	16,11 Km	29,44 Km	39,44 Km
	48h	40.638	2.171	29--30	15,56 Km	28,33 Km	38,33 Km
	72h	40.646	1.919	31--01	15,56 Km	27,78 Km	41,11 Km
97545		lat	lon				
	0h	40.933	1.599	27--28	13,33 Km	26,67 Km	42,22 Km
	24h	40.867	1.267	28--29	13,89 Km	28,89 Km	41,67 Km
	48h	40.87	1.206	29--30	13,33 Km	25,56 Km	39,44 Km
	72h	40.878	1.011	31--01	13,33 Km	25,00 Km	38,33 Km
97546		lat	lon				
	0h	40.192	1.413	27--28	14,44 Km	27,78 Km	40,56 Km
	24h	40.005	1.209	28--29	13,89 Km	27,22 Km	41,11 Km
	48h	39.962	0.864	29--30	13,33 Km	26,67 Km	39,44 Km
	72h	39.919	0.542	31--01	13,89 Km	28,89 Km	41,67 Km

nº de casos válidos	226,11 Km	439,44 Km	639,44 Km
	16	16	16
media	14,13 Km	27,47 Km	39,97 Km

Tabla II.5: Radios medios para las simulaciones de vertidos con radio inicial 75m y duración de las simulaciones 24h

Boya	Instante	Coordenadas		Duración (fechas)		factor turbulento	
97543		lat	lon			0.05	0.1
	0h	40.294	1.593	27--29	18,89 Km	32,22 Km	47,78 Km
	24h	40.101	1.374	28--30	17,78 Km	31,67 Km	47,22 Km
	48h	39.966	1.105	29--01	17,78 Km	37,78 Km	50,00 Km
97544		lat	lon				
	0h	40.616	2.526	27--29	19,44 Km	36,67 Km	53,33 Km
	24h	40.605	2.431	28--30	18,89 Km	34,44 Km	48,89 Km
	48h	40.638	2.171	29--01	18,89 Km	34,44 Km	50,00 Km
97545		lat	lon				
	0h	40.933	1.599	27--29	16,11 Km	27,78 Km	Impacto
	24h	40.867	1.267	28--30	Impacto	Impacto	Impacto
	48h	40.87	1.206	29--01	15,56 Km	31,11 Km	Impacto
97546		lat	lon				
	0h	40.192	1.413	27--29	16,11 Km	31,11 Km	44,44 Km
	24h	40.005	1.209	28--30	16,67 Km	42,22 Km	61,11 Km
	48h	39.962	0.864	29--01	17,22 Km	44,44 Km	66,67 Km
				nº de casos válidos	193,33314 Km	383,888505 Km	469,443975 Km
				media	11	11	9
					17,58 Km	34,90 Km	52,16 Km

Tabla II.6: Radios medios para las simulaciones de vertidos con radio inicial 75m y duración de las simulaciones 48h

SIMULACIONES EN MODO RETROANÁLISIS.  
PRECISIÓN Y TAMAÑO DE LA MANCHA. RESULTADOS

---

*ANEJO 3*

Boya	Instante	Coordenadas		Duración (fechas)	factor turbulento					
					0,05		0,1		0,15	
	lat	lon			Radio	Error	Radio	Error	Radio	Error
97543				01--30	7,9 Km	8,1 Km	15,7 Km	5,7 Km	17,0 Km	4,9 Km
	0h	40	0.764							
	24h	39.966	1.105	30--29	7,9 Km	7,3 Km	14,4 Km	5,7 Km	15,7 Km	4,9 Km
	48h	40.101	1.374	29--28	7,9 Km	16,2 Km	15,7 Km	14,6 Km	19,7 Km	14,6 Km
97544				28--27	9,2 Km	10,5 Km	15,7 Km	13,8 Km	19,7 Km	13,0 Km
	0h	40.646	1.919							
	24h	40.638	2.171	01--30	7,9 Km	8,9 Km	13,1 Km	8,1 Km	17,0 Km	5,7 Km
	48h	40.605	2.431	30--29	6,6 Km	9,7 Km	11,8 Km	8,9 Km	17,0 Km	5,7 Km
97545				29--28	7,9 Km	16,2 Km	14,4 Km	15,4 Km	17,0 Km	13,0 Km
	72h	40.616	2.526	28--27	6,6 Km	10,5 Km	14,4 Km	15,4 Km	18,4 Km	12,2 Km
	0h	40.878	1.011							
	24h	40.87	1.206	01--30	6,6 Km	12,2 Km	13,1 Km	10,5 Km	18,4 Km	7,3 Km
97546				30--29	7,9 Km	13,0 Km	13,1 Km	9,7 Km	17,0 Km	8,1 Km
	48h	40.867	1.267	29--28	7,9 Km	18,7 Km	14,4 Km	16,2 Km	19,7 Km	13,8 Km
	72h	40.933	1.599	28--27	6,6 Km	21,1 Km	13,1 Km	20,3 Km	19,7 Km	12,2 Km
	0h	39.919	0.542							
	24h	39.962	0.864	01--30	6,6 Km	8,9 Km	14,4 Km	7,3 Km	15,7 Km	6,5 Km
	48h	40.005	1.209	30--29	6,6 Km	9,7 Km	14,4 Km	8,1 Km	15,7 Km	5,7 Km
	72h	40.192	1.413	29--28	5,2 Km	18,7 Km	13,1 Km	17,8 Km	17,0 Km	15,4 Km
				28--27	6,6 Km	16,2 Km	14,4 Km	13,8 Km	19,7 Km	12,2 Km
nº de casos válidos					115,4 Km	206,0 Km	225,5 Km	191,4 Km	284,5 Km	154,9 Km
					16	16	16	16	16	16
media					7,21 Km	12,88 Km	14,09 Km	11,96 Km	17,78 Km	9,68 Km
Desviación					0,96 Km	4,35 Km	1,12 Km	4,52 Km	1,51 Km	3,89 Km

Tabla III.1: Radios medios y errores de precisión medios para las simulaciones en modo retroanálisis. Duración de las simulaciones -24



Boya	Instante	Coordenadas		Duración (fechas)	factor turbulento					
					0.05			0.1		
		lat	lon		Radio	Error	Radio	Error	Radio	Error
97543	48h		40	01--29	13,1 Km	17,0 Km	17,0 Km	19,5 Km	30,2 Km	27,6 Km
	24h		39.966	30--28	11,8 Km	21,9 Km	19,7 Km	18,7 Km	32,8 Km	28,4 Km
	0h		40.101	29--27	10,5 Km	19,5 Km	17,0 Km	18,7 Km	26,2 Km	24,3 Km
97544		lat	lon							
	48h		40.646	01--29	11,8 Km	17,8 Km	18,4 Km	17,8 Km	27,5 Km	13,0 Km
	24h		40.638	30--28	11,8 Km	10,5 Km	19,7 Km	9,7 Km	27,5 Km	9,7 Km
97545	0h		40.605	29--27	10,5 Km	11,4 Km	18,4 Km	9,7 Km	28,8 Km	9,7 Km
		lat	lon							
	48h		40.878	01--29	13,1 Km	32,4 Km	23,6 Km	18,7 Km	32,8 Km	13,8 Km
97546	24h		40.87	30--28	13,1 Km	31,6 Km	23,6 Km	20,3 Km	30,2 Km	13,0 Km
	0h		40.867	29--27	10,5 Km	28,4 Km	23,6 Km	19,5 Km	26,2 Km	15,4 Km
		lat	lon							
97546	48h		39.919	01--29	15,7 Km	12,2 Km	30,2 Km	18,7 Km	30,2 Km	7,3 Km
	24h		39.962	30--28	19,7 Km	12,2 Km	28,8 Km	17,8 Km	45,9 Km	5,7 Km
	0h		40.005	29--27	11,8 Km	10,5 Km	26,2 Km	6,5 Km	26,2 Km	9,7 Km
					153,4 Km	225,5 Km	266,2 Km	195,5 Km	364,5 Km	177,6 Km
					nº de casos válidos	12	12	12	12	12
					media	12,78 Km	18,79 Km	22,18 Km	16,29 Km	30,37 Km
					Desviación	2,630 Km	8,183 Km	4,523 Km	5,675 Km	7,765 Km

Tabla III.2: Radios medios y errores de precisión medios para las simulaciones en modo retroanálisis. Duración de las simulaciones -48H